This is a digital copy of a book that was preserved for generations on library shelves before it was carefully scanned by Google as part of a project to make the world's books discoverable online.

It has survived long enough for the copyright to expire and the book to enter the public domain. A public domain book is one that was never subject to copyright or whose legal copyright term has expired. Whether a book is in the public domain may vary country to country. Public domain books are our gateways to the past, representing a wealth of history, culture and knowledge that's often difficult to discover.

Marks, notations and other marginalia present in the original volume will appear in this file - a reminder of this book's long journey from the publisher to a library and finally to you.

Usage guidelines

Google is proud to partner with libraries to digitize public domain materials and make them widely accessible. Public domain books belong to the public and we are merely their custodians. Nevertheless, this work is expensive, so in order to keep providing this resource, we have taken steps to prevent abuse by commercial parties, including placing technical restrictions on automated querying.

We also ask that you:

+ *Make non-commercial use of the files* We designed Google Book Search for use by individuals, and we request that you use these files for personal, non-commercial purposes.

+ *Refrain from automated querying* Do not send automated queries of any sort to Google's system: If you are conducting research on machine translation, optical character recognition or other areas where access to a large amount of text is helpful, please contact us. We encourage the use of public domain materials for these purposes and may be able to help.

+ *Maintain attribution* The Google "watermark" you see on each file is essential for informing people about this project and helping them find additional materials through Google Book Search. Please do not remove it.

+ *Keep it legal* Whatever your use, remember that you are responsible for ensuring that what you are doing is legal. Do not assume that just because we believe a book is in the public domain for users in the United States, that the work is also in the public domain for users in other countries. Whether a book is still in copyright varies from country to country, and we can't offer guidance on whether any specific use of any specific book is allowed. Please do not assume that a book's appearance in Google Book Search means it can be used in any manner anywhere in the world. Copyright infringement liability can be quite severe.

About Google Book Search

Google's mission is to organize the world's information and to make it universally accessible and useful. Google Book Search helps readers discover the world's books while helping authors and publishers reach new audiences. You can search through the full text of this book on the web at `http://books.google.com/`

Über dieses Buch

Dies ist ein digitales Exemplar eines Buches, das seit Generationen in den Regalen der Bibliotheken aufbewahrt wurde, bevor es von Google im Rahmen eines Projekts, mit dem die Bücher dieser Welt online verfügbar gemacht werden sollen, sorgfältig gescannt wurde.

Das Buch hat das Urheberrecht überdauert und kann nun öffentlich zugänglich gemacht werden. Ein öffentlich zugängliches Buch ist ein Buch, das niemals Urheberrechten unterlag oder bei dem die Schutzfrist des Urheberrechts abgelaufen ist. Ob ein Buch öffentlich zugänglich ist, kann von Land zu Land unterschiedlich sein. Öffentlich zugängliche Bücher sind unser Tor zur Vergangenheit und stellen ein geschichtliches, kulturelles und wissenschaftliches Vermögen dar, das häufig nur schwierig zu entdecken ist.

Gebrauchsspuren, Anmerkungen und andere Randbemerkungen, die im Originalband enthalten sind, finden sich auch in dieser Datei – eine Erinnerung an die lange Reise, die das Buch vom Verleger zu einer Bibliothek und weiter zu Ihnen hinter sich gebracht hat.

Nutzungsrichtlinien

Google ist stolz, mit Bibliotheken in partnerschaftlicher Zusammenarbeit öffentlich zugängliches Material zu digitalisieren und einer breiten Masse zugänglich zu machen. Öffentlich zugängliche Bücher gehören der Öffentlichkeit, und wir sind nur ihre Hüter. Nichtsdestotrotz ist diese Arbeit kostspielig. Um diese Ressource weiterhin zur Verfügung stellen zu können, haben wir Schritte unternommen, um den Missbrauch durch kommerzielle Parteien zu verhindern. Dazu gehören technische Einschränkungen für automatisierte Abfragen.

Wir bitten Sie um Einhaltung folgender Richtlinien:

+ *Nutzung der Dateien zu nichtkommerziellen Zwecken* Wir haben Google Buchsuche für Endanwender konzipiert und möchten, dass Sie diese Dateien nur für persönliche, nichtkommerzielle Zwecke verwenden.

+ *Keine automatisierten Abfragen* Senden Sie keine automatisierten Abfragen irgendwelcher Art an das Google-System. Wenn Sie Recherchen über maschinelle Übersetzung, optische Zeichenerkennung oder andere Bereiche durchführen, in denen der Zugang zu Text in großen Mengen nützlich ist, wenden Sie sich bitte an uns. Wir fördern die Nutzung des öffentlich zugänglichen Materials für diese Zwecke und können Ihnen unter Umständen helfen.

+ *Beibehaltung von Google-Markenelementen* Das "Wasserzeichen" von Google, das Sie in jeder Datei finden, ist wichtig zur Information über dieses Projekt und hilft den Anwendern weiteres Material über Google Buchsuche zu finden. Bitte entfernen Sie das Wasserzeichen nicht.

+ *Bewegen Sie sich innerhalb der Legalität* Unabhängig von Ihrem Verwendungszweck müssen Sie sich Ihrer Verantwortung bewusst sein, sicherzustellen, dass Ihre Nutzung legal ist. Gehen Sie nicht davon aus, dass ein Buch, das nach unserem Dafürhalten für Nutzer in den USA öffentlich zugänglich ist, auch für Nutzer in anderen Ländern öffentlich zugänglich ist. Ob ein Buch noch dem Urheberrecht unterliegt, ist von Land zu Land verschieden. Wir können keine Beratung leisten, ob eine bestimmte Nutzung eines bestimmten Buches gesetzlich zulässig ist. Gehen Sie nicht davon aus, dass das Erscheinen eines Buchs in Google Buchsuche bedeutet, dass es in jeder Form und überall auf der Welt verwendet werden kann. Eine Urheberrechtsverletzung kann schwerwiegende Folgen haben.

Über Google Buchsuche

Das Ziel von Google besteht darin, die weltweiten Informationen zu organisieren und allgemein nutzbar und zugänglich zu machen. Google Buchsuche hilft Lesern dabei, die Bücher dieser Welt zu entdecken, und unterstützt Autoren und Verleger dabei, neue Zielgruppen zu erreichen. Den gesamten Buchtext können Sie im Internet unter `http://books.google.com` durchsuchen.

Technische Messungen

insbesondere bei

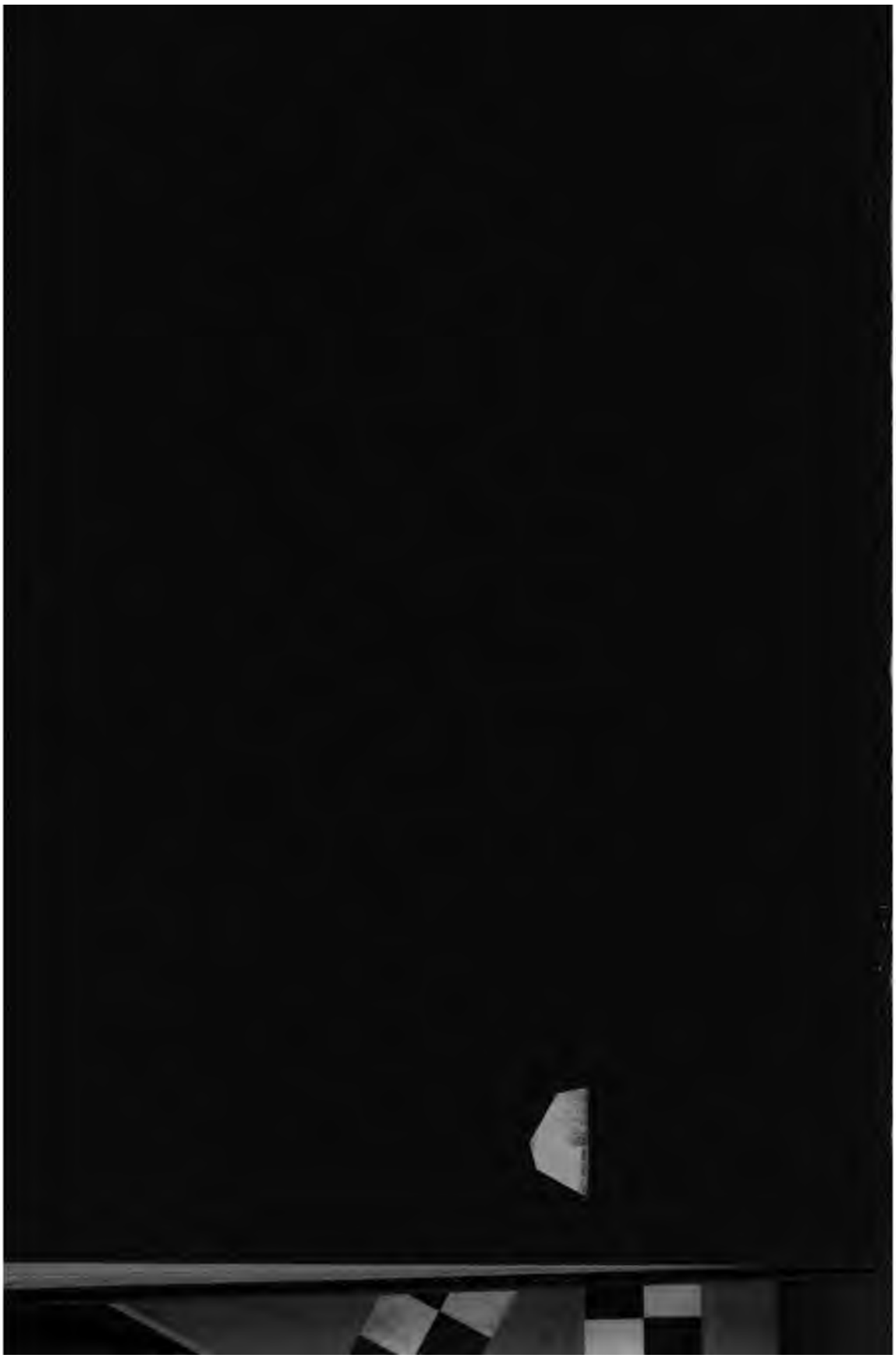
Maschinenuntersuchungen

von

A. Gramberg

ER

Library
of the
University of Wisconsin



Technische Messungen

von

Anton Gramberg.

Technische Messungen

insbesondere bei

Maschinenuntersuchungen.

Zum Gebrauch in Maschinenlaboratorien
und für die Praxis.

Von

Anton Gramberg,

Diplom-Ingenieur, Dozent an der technischen Hochschule Danzig.

Mit 181 Textfiguren.

Berlin.

Verlag von Julius Springer.

1905.

Alle Rechte vorbehalten.

Spamersche Buchdruckerei in Leipzig.

92738
JAN 31 1906

TBD
·G76

6792198

Vorwort.

Die folgende Arbeit ist das Ergebnis meiner Tätigkeit an dem Maschinenlaboratorium der Technischen Hochschule Charlottenburg, unter Leitung des Herrn Professor Josse, sowie insbesondere das Ergebnis der Besichtigung zahlreicher Laboratorien und Fabriken in Deutschland und den Vereinigten Staaten; der Literatur konnte nur wenig entnommen werden. Die Arbeit bringt ein begrenztes Gebiet zur Darstellung, nämlich die bei der Untersuchung fertiger Maschinen angewendeten Einzelmessungen. Rein elektrische Messungen sind ausgeschlossen. Die Besprechung auch des Materialprüfungswesens sowie anderer für die Herstellung der Maschinen erforderlicher Messungen unterblieb zunächst.

Im folgenden sollen Studierende und Praktiker eine Anleitung zum verständigen Gebrauch der Meßinstrumente finden. Konstruktion und Theorie der Instrumente sind soweit besprochen, wie sie für die Handhabung von Bedeutung sind. Ich war bestrebt, nicht irgend welche interessanten Sonderkonstruktionen zu behandeln, sondern die alltäglich und allerwärts benutzten Methoden so darzustellen, daß dadurch das Verständnis für ihre Zweckmäßigkeit und ihren Wert vertieft wird. Wer den mannigfachen Inhalt beachtet, wird zugeben, daß es Schwierigkeiten bot, denselben auf so engem Raum nicht nur oberflächlich darzustellen.

Während in der jüngeren elektrotechnischen Industrie das Meßwesen weit vorangeschritten ist und auf Schritt und Tritt Fabrikation und Betrieb beherrscht, dank dem Umstande, daß physikalische Methoden sich verhältnismäßig bequem übertragen ließen, kann man ein gleiches von den im allgemeinen Maschinenbau üblichen Meßmethoden nicht sagen. Weder sind Messungen so allgemein üblich, noch ist die Kenntnis der Eigenschaften von Instrumenten und der Erfordernisse für genaues Messen so allgemein verbreitet. Vielleicht kann da ein Werk wie das vorliegende nützlich sein.

Wenn ich irgend eine Tendenz des Werkes angeben sollte, so ist es die, das Urteil hinsichtlich der Zuverlässigkeit technischer Meßergebnisse zu schärfen. Indizierte Leistungen in fünfziffrigen Zahlen anzugeben ist nur zu üblich, und doch ist die dritte schon unsicher; solche Beispiele ließen sich häufen. Freilich ist das nicht nur ein technischer Fehler: auch die Regnaultschen Dampftabellen gibt man in fünfziffrigen Zahlen, während

doch die Grundlagen viel weniger genau sind. Man sollte aber im allgemeinen nur noch die erste zweifelhafte Stelle angeben. An Beispielen suche ich zu zeigen, wie große Fehler durch die üblichen Vernachlässigungen entstehen, und man wird über deren Größe erstaunen.

Das beigegebene Literaturverzeichnis wird ohne Zweifel nützlich sein. Gutes ist freilich in der Literatur über Messungen nur selten zu finden. Daß die Angaben von Bezugsquellen nicht geschäftlichen Interessen dienen, sondern ein Wegweiser für den sein sollen, der Instrumente beschaffen will, ist selbstredend.

Ich machte mich an die Bearbeitung des Werkes, weil mir ein Bedürfnis dafür vorzuliegen schien; möge es demselben etwas abhelfen.

Danzig, im März 1905.

Anton Gramberg.

Inhaltsverzeichnis.

Technische Messungen.

Seite

I. Einheiten.

1. Messen nach Einheiten 1
2. Zusammengesetzte Einheiten 1
3. Dimensionen 2
4. Homogenität von Formeln 2
5. Dimensionen bei graphischen Darstellungen 3
6. Technische Einheiten 4
7. Technisches und physikalisches Maßsystem 4

II. Auswertung.

8. Prozentrechnungen 5
9. 10. Einfache, quadratische und andere Mittelwerte 5
11. Mittelwert bei Produkten 7
12. Verallgemeinerung: Beharrungszustand der Maschinen 7
13. Auf wieviel Stellen rechnen? Differenzmethoden 8
14. Nicht zu viele Stellen! 9
15. Graphische Darstellung (Schaubild) 9
16. Unsicherheiten dabei 10
17. Änderung der äußeren Bedingungen, isometrische Darstellungen . 11

III. Eigenschaften der Instrumente: Eichungen.

18. Anforderungen 11
19. Unrichtige Gangart, Eichung, Korrektionen 11
20. Unempfindlichkeit durch Reibung 12
21. Abhängigkeit vom vorhergehenden Zustand 13
22. Trägheit; Dämpfung 13
23. Skalen- und Ausgleichinstrumente 14
24. Totalisierende Instrumente 14
25. Kritik der Eigenschaften 15
26. Ausführung von Eichungen, Darstellung der Ergebnisse 15
27. Was eichen? 17
28. Parallaktischer Fehler, Anklopfen beim Ablesen 17

IV. Längenmessung.

29. Einheiten; Druck und Temperatur 17
30. Übersicht der Meßmethoden 19
31. Maßstäbe; Nonius 19
32. End- und Strichmaße 20
33. Schraublehre 21
34. Meßmaschine 22
35. Stichmaße, Grenzlehren 24

Seite

V. Flächenmessung.

36. Einheiten; Übersicht der Instrumente 25
37. Amslersches Polarplanimeter 26
38. Theorie desselben 26
39. Große Flächen 29
40. Folgerungen aus der Theorie; Linearplanimeter 29
41. Praktische Regeln; Genauigkeit 30
42. Simpsonsche Regel 31

VI. Zeitmessung.

43. Einheiten; Arretieruhr 32

VII. Messung der Geschwindigkeit.

44. Einheiten 32
45. Einheiten für drehende Bewegung 33
46. Übersicht der Meßmethoden; Beziehungen zwischen fortschreitender und Drehgeschwindigkeit 34
47. Umlaufzähler 34
48. Praktisches 37
49. Tachometer 37
50. Enger und weiter Meßbereich 38
51. Antrieb derselben 39
52. Handtachometer 39
53. Außergewöhnliche Tachometer 40
54. Kritik: Zählwerk und Tachometer 41
55. Ungleichförmigkeit 41
56. Tachograph 42
57. Woltmannscher Flügel 43
58. Theorie; Flügelgleichung 45
59. Eichung der Flügel 46
60. Pitotrohr 47
61. Ausführungsformen; Schwierigkeiten; Eichung 48
62. Anemometer; Pitotrohr für Luftmessung 49

VIII. Messung der Stoffmenge.

63. Gewicht, Volumen, spezifisches Gewicht; Einheiten 51
64. Einfluß der Temperatur 52
65. Reduziertes und unreduziertes Volumen bei Gasen. Einfluß der Feuchtigkeit 54
66. Wann Gewicht, wann Volumen angeben? 55
67. Aräometer 56
68. Spezifisches Gewicht von Gasen; Schilling-Bunsenscher Apparat; Luxsche Gaswage 57
69. Einfluß der Feuchtigkeit 59
70. Wagen; Übersicht 60
71. Auftrieb der Luft 60
72. Brückenwagen 60
73. Entlastung; Wägemaschinen 62
74. Eichung 62
75. Wägen von Flüssigkeiten; Brutto, Netto, Tara; Praktisches . . 63
76. Kalibrierte Gefäße 64
77. Dauernd fließende Flüssigkeiten; Übersicht der Methoden . . . 64
78. Wägen; Ausmessen 65
79. Ausflußöffnungen 66
80. Kontraktions-, Ausfluß-, Geschwindigkeitskoeffizient 67

Seite
81. Scharfe und abgerundete Mündungen 67
82. Praktisches 68
83. Brauersche Methode für wechselnden Wasserfluß 69
84. Wehrmessungen 69
85. Ausflußkoeffizient; Wehre mit und ohne Seitenkontraktion . . . 70
86. Werte von Ausflußkoeffizienten 72
87. Praktisches 73
88. Anwendungsbereich der einzelnen Methoden 75
89. Wassermessung mit Woltmannschem Flügel 75
90. Flügelrad- und Kolbenwassermesser 76
91. Anforderungen; Kritisches 78
92. Gasmessung; Übersicht der Methoden 79
93. Meßglocken 80
94. Gasmesser 81
95. Anforderungen; Praktisches 83
96. Eichung der Gasmesser 84
97. Auffüllmethode 85
98. Ausblasemethode 86
99. Durchflußöffnungen 87
100. Eichung derselben 88
101. Luftmessung mit Anemometer 88
102. Luftmenge aus dem Diagramm 88
103. Dampfmessung durch Kondensieren 89
104. Kalorimetrische Dampfmessung bei Mischkondensationen 90
105. Dampfmessung aus dem Diagramm 90
106. Dampfmesser 90
107. Durchflußöffnungen 91

IX. Messung der Spannung.

108. Definition 91
109. Einheiten 91
110. Manometer und Vakuummeter; absoluter Druck, Überdruck, Vakuum 93
111. Kritik der Vakuumangaben 93
112. Übersicht der Meßmethoden 96
113. Quecksilbermanometer 96
114. Wasser- und ähnliche Manometer 98
115. Federmanometer 99
116. Praktisches für ihre Verwendung 101
117. Kolbenmanometer 101
118. Messen kleiner Spannungen: Zugmesser, Differentialmanometer . 103
119. Eichung 105
120. Störende Wassersäulen 105
121. Messung von Wasserspannungen, von Spannungen bei fließendem Medium 106
122. Dampfspannung und Temperatur 107

X. Messung von Kraft, Drehmoment, Arbeit, Leistung.

123. Definitionen 107
124. Definition für drehende Bewegung 108
125. Einheiten 109
126. Übersichtliche Zusammenstellung 110
127. Übersicht der Meßmethoden 111
128. Indizierte und effektive Leistung 112

Seite
129. Dynamometer für Kraftmessung 112
130. Rotationsdynamometer: Wiegedynamometer 113
131. Getriebedynamometer 115
132. Torsionsdynamometer 117
133. Justierung; Eichung 118
134. Umgehung der Dynamometer 118
135. Bremsdynamometer: Zaum 119
136. Praktisches; Schmierung und Kühlung 120
137. Bandbremse 121
138. Selbstregulierende (automatische) Bremsen 122
139. Alden-Bremse 124
140. Flüssigkeitsbremsen (hohe Tourenzahl) 126
141. Wirbelstrombremsen 127
142. Seilbremse; Einfluß von Seil- und Hakengewicht 128
143. Kritik: Seilbremse und Zaum 129
144. Dimensionierung von Bremsen 129
145. Wechselwirkung zwischen Bremse und Motor 130
146. Elektrische Leistungsmessung 132
147. Wirkungsgrad der elektrischen Maschinen 132
148. Schaltung für Antrieb von Arbeitsmaschinen 134
149. Schaltung für Bremsung von Kraftmaschinen 135
150. Belastungswiderstände 136
151. Indikator und Diagramm 137
152. Indikatorteile 138
153. Auswertung des Diagramms 139
154. Auswertung bei Dauerversuchen; Zylinderkonstante; Beispiel . . 141
155. Beschreibung von Indikatoren 143
156. Kaltfederindikator 145
157. Zubehörteile; Praktisches 147
158. Federmaßstab, Eichung 148
159. Mittlerer und wahrer Federmaßstab 149
160. Gewichts- und Spannungseichung, warm und kalt 150
161. Versetzte Diagramme; Zeit- und Kurbelwegdiagramme 151
162. Störung des Maschinenganges durch den Indikator 152
163. Massenschwingungen des Kolbens 153
164. Schwingungen als Zeichen eines guten Indikators 155
165. Wirkung der Trommelmasse 157
166. Fälschungen des Diagramms 159
167. Indizieren bei hohen Tourenzahlen 160
168. Indizieren bei hoher Spannung 160
169. Indikatoren mit großem Kolben 161
170. Andere Spezialindikatoren: für Kältemaschinen, für fortlaufende Diagramme 162
171. Versuche, den Indikator zu ersetzen 162

XI. Messung der Temperatur.

172. Einheit 163
173. Quecksilber- und Wasserstoffskala 163
174. Quecksilberthermometer 164
175. Messung hoher und tiefer Temperaturen 165
176. Fadenkorrektion 165
177. Anbringung der Thermometer 167
178. Thermoelektrische Pyrometer 167

Seite
179. 180. Andere Temperaturmessungen 170
181. Thermometereichung 172
XII. Messung der Wärmemenge.
182. Kalorimetrie 173
183. Wahre und mittlere spezifische Wärme 174
184. Verschiedene Wärmeeinheiten. Spezifische Wärme des Wassers 174
XIII. Messung des Heizwertes von Brennstoffen.
185. Einheiten 176
186. Oberer und unterer Heizwert 176
187. Welcher von beiden Heizwerten ist maßgebend? 177
188. Übersicht der Meßmethoden 178
189. Krökersche Bombe 179
190. Aspirator 181
191. Handhabung der Bombe 181
192. Auswertung; Korrektionen; Beispiel 182
193. Probenahme 184
194. Einfluß der Strahlung 185
195. Zusammensetzung der Kohle 185
196. Junkers-Kalorimeter 187
197. Messung des Kondenswassers 187
198. Schwierigkeiten bei Sauggas-, Kraft- und Gichtgasuntersuchung . 189
199. Fehlerquellen 189
200. Beispiel 190
201. Flüssige Brennstoffe 191
XIV. Messung der Feuchtigkeit von Luft und Dampf.
202. Luftfeuchtigkeit; Notwendigkeit, sie zu beachten 191
203. Absolute und relative Feuchtigkeit 192
204. Bestimmung der absoluten Feuchtigkeit 193
205. Bestimmung der relativen Feuchtigkeit 194
206. Dampffeuchtigkeit; spezifischer Dampfgehalt 195
207. Drosselkalorimeter 196
208. Abscheidekalorimeter 197
209. Andere Methoden 198
210. Probenahme; Unsicherheit dabei 200
XV. Gasanalyse.
211. Aufgabe und Zweck 200
212. Rauchgasanalyse; Verfahren im Prinzip 201
213. Orsatapparat 201
214. Handhabung 202
215. Luftüberschußkoeffizient 203
216. Was mißt die Analyse? Überschlägliche Kontrolle des Ergebnisses 204
217. Probeentnahme 205
218. Selbsttätige Apparate 206
219. Menge der Rauchgase 207
220. Essenverluste 207
221. Raum- und Gewichtsprozente 209
222. Analyse anderer Gase; Bestimmung von Kohlenwasserstoffen 210
und H 211
Literatur- und Bezugsquellen-Verzeichnis 213
Register 219

Berichtigung.

In Fig. 85, Seite 89, hat Buchstabe *d* am Kompressionsendpunkt, also an der rechten oberen Ecke des Diagrammes zu stehen.

I. Einheiten.

1. **Messung nach Einheiten.** Jede Messung hat den Zweck, die zu messende Größe unter Benutzung irgend einer Einheit zahlenmäßig festzulegen, mit anderen Worten, festzustellen, wie oft die betreffende Einheit in der gemessenen Größe enthalten ist. Haben wir die Länge eines Stabes zu 3,5 m festgestellt, so ist das Meter die Einheit nach der wir messen — natürlich auch eine Länge. Die Zahl 3,5 gibt uns an, daß ein Meter dreimal vollständig in der gemessenen Länge enthalten ist, außerdem bleibt noch 0,5 m übrig.

Als Ergebnis der Messung erhalten wir hier wie meist eine benannte Zahl. Die Benennung ist die Einheit, mit der wir gemessen haben.

2. **Zusammengesetzte Einheiten.** Nicht immer ist diese Benennung so einfach wie eben. Für Geschwindigkeiten z. B. — wir dürfen das als bekannt voraussetzen — geben wir das Meßergebnis in Metern pro Sekunde an. Man stellt etwa fest, daß ein Eisenbahnzug den Weg von 250 m in der Zeit von 25 sec durchläuft. Man hat beide Zahlen zu dividieren um die Geschwindigkeit zu erhalten: sie ist $\frac{250\ \text{m}}{25\ \text{sec}} = 10\ \frac{\text{m}}{\text{sec}}$.

Man nennt die Einheit: Meter pro Sekunde eine abgeleitete Einheit. Sie ist nämlich abgeleitet aus den beiden Grundeinheiten, dem Meter für die Länge und der Sekunde für die Zeit. Die Schreibweise $\frac{\text{m}}{\text{sec}}$ für diese abgeleitete Einheit hat außer dem Vorzug der Kürze noch den weiteren, daß man aus ihr ersieht, man habe die Zahl der Meter durch die Zahl der Sekunden zu teilen, um die Geschwindigkeit zu erhalten.

Für Messung der Arbeit pflegt das Meterkilogramm als Einheit zu dienen. Hebt man das Gewicht von 3 kg um 5 m in die Höhe, so leistet man $5\ \text{m} \cdot 3\ \text{kg} = 15\ \text{m} \cdot \text{kg}$ Arbeit. Die Schreibweise m·kg gibt wieder an, wie die Arbeitseinheit aus den Grundeinheiten entstanden ist, nämlich durch Multiplizieren.

Wirkt ein Gewicht von 18 kg an einem Hebelarm von 4 m, so übt es ein Moment — Dreh-, Biegungsmoment oder dergleichen — aus von $4\ \text{m} \cdot 18\ \text{kg} = 72\ \text{m} \cdot \text{kg}$. Wir sehen also, daß zwei verschiedenartige Größen eine gleichlautende Benennung haben können. Trotz dieser formalen Übereinstimmung bleiben sie natürlich verschiedenartige Größen. Im allgemeinen aber ist die Benennung für die Art der zu messenden Größe

charakteristisch: eine Angabe mit der Benennung m·kg kann keine Geschwindigkeit sein.

3. **Dimensionen.** Wir haben eben neue Einheiten aus den Grundeinheiten: Meter für die Länge, Kilogramm für die Kraft (das Gewicht) und Sekunde für die Zeit abgeleitet. Wir werden finden, daß wir jede zu messende Größe in ähnlicher Weise aus diesen drei Grundeinheiten ableiten können; nur sie bezeichnet man daher als Grundeinheiten.

Schreiben wir die Benennung in der an einigen Beispielen angedeuteten Art so, daß man erkennt, wie die betreffende Einheit aus den Grundeinheiten abgeleitet ist, so haben wir die Dimension der zu messenden Größe. $\left[\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{sec}}\right]$ ist die Dimension der Geschwindigkeit, [m·kg] ist die der Arbeit oder des statischen Moments. Der Gebrauch, die Dimensionsangabe in eckige Klammern zu fassen, rührt, wie der Begriff Dimension selbst, von Maxwell her.

4. **Homogenität von Formeln.** Das Beachten der Dimensionen bewahrt oft vor Fehlern in der Rechnung, und kürzt manche Rechnung ab. Es ist daher gerade bei der Auswertung von Versuchsergebnissen oft nützlich, wie einige Beispiele zeigen mögen.

Jede Gleichung, welcher Art auch immer, muß homogen sein, das heißt die Dimension der beiden Seiten muß die gleiche sein. Andernfalls liegt ein Fehler im Ansetzen der Gleichung vor. Prüfen wir darauf hin einen bekannten Satz der Mechanik, nämlich den von der kinetischen Energie: $P \cdot s = \frac{1}{2} M \cdot w^2$. P ist die Kraft, welche während des Weges s auf die Masse M wirkt und ihr dadurch die Geschwindigkeit w erteilt. P als Kraft hat die Dimension [kg]; s als Weg hat die Dimension [m]; w als Geschwindigkeit hat die Dimension $\left[\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{sec}}\right]$, die quadratisch, also als $\left[\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{sec}}\right]^2 = \left[\frac{\mathrm{m}^2}{\mathrm{sec}^2}\right]$ einzuführen ist. Die Masse wird durch die Formel $M = \frac{G}{g} = \frac{\text{Gewicht}}{\text{Beschleunigung der Schwere}}$ definiert; die Beschleunigung ihrerseits ist die Geschwindigkeitszunahme pro Sekunde, hat also die Dimension $\left[\frac{\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{sec}}}{\mathrm{sec}}\right] = \left[\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{sec}^2}\right]$; daraus folgt die Dimension der Masse $\left[\frac{\mathrm{kg}}{\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{sec}^2}}\right] = \left[\frac{\mathrm{kg} \cdot \mathrm{sec}^2}{\mathrm{m}}\right]$.

Wenn wir nun alle diese Dimensionswerte in die Formel $P \cdot s = \frac{1}{2} M w^2$ einsetzen, so kommt $[\mathrm{kg}] \cdot [\mathrm{m}] = \left[\frac{\mathrm{kg} \cdot \mathrm{sec}^2}{\mathrm{m}}\right] \cdot \left[\frac{\mathrm{m}^2}{\mathrm{sec}^2}\right]$. Die Zahl $\frac{1}{2}$ ist auf die Dimensionsbestimmung ohne Einfluß. Wir heben nun rechts sec^2 gegen sec^2, und m gegen m. Dann haben wir $[\mathrm{kg} \cdot \mathrm{m}] = [\mathrm{kg} \cdot \mathrm{m}]$. Die Gleichung ist also homogen. Solche Prüfung fördert oft Fehler zu Tage.

Man kann eine Geschwindigkeit statt in $\frac{m}{sec}$ auch in $\frac{km}{Stde}$ angeben, wie dies bei der Eisenbahn üblich ist. Die Gleichung $100 \frac{km}{Stde} = 27{,}8 \frac{m}{sec}$ ist offenbar homogen; es kommt also nicht auf die Einheiten beiderseits an, sondern nur auf die Tatsache, daß beiderseits Länge durch Zeit geteilt wird. Es ist $100 \frac{km}{Stde} = 100 \cdot \frac{1000\ m}{3600\ sec} = \frac{100\,000}{3600} \frac{m}{sec} = 27{,}8 \frac{m}{sec}$.

Daß jede Gleichung homogen sein muß, folgt daraus, daß sonst nicht die Wahl der Einheit ohne Einfluß auf das Ergebnis der Rechnung bliebe. Hat die linke Seite einer Gleichung die Dimension $\frac{m}{sec}$, und man will auf die Einheit $\frac{cm}{sec}$ übergehen, so wird offenbar der davorstehende Koeffizient hundertmal so groß; nur wenn auch auf der rechten Seite der Gleichung eine Länge im Zähler des Dimensionsbruches steht, wird auch dort der Koeffizient verhundertfacht, und die Gleichung bleibt dieselbe.

5. **Dimensionen bei graphischen Darstellungen.** Weiterhin gewährt die Beachtung der Dimension Vorteile bei Rechnungen folgender Art: In einem Koordinatennetz (Fig. 1) stellen wir Kräfte P als Ordinaten dar, bezogen auf die Wege s des Angriffspunktes als Abszissen. Die Fläche F unter der Kurve stellt dann die geleistete Arbeit $P \cdot s$ dar, aber in welchem Maßstab? Das findet man am einfachsten so: Wir hatten P aufgetragen im Maßstab 1 cm = 100 kg, und s im Maßstab 1 cm = 0,5 m Weg des Angriffspunktes; dann folgt durch Ausmultiplizieren der beiden linken und der beiden rechten Seiten: 1 cm · 1 cm = 100 kg · 0,5 m; 1 qcm = 100 · 0,5 = 50 m·kg als Maßstab der Arbeiten.

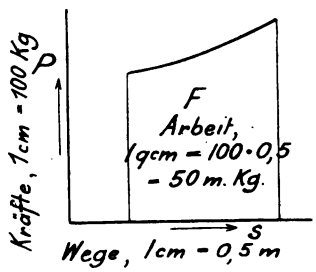


Fig. 1.

Ein ähnliches Beispiel: Die Volumina eines Gases oder des Dampfes im Dampfzylinder sind als Abszissen aufgetragen, Maßstab: 5 cm = 1 cbm = 1 m^3. Die zugehörigen Spannungen sind als Ordinaten verzeichnet, Maßstab: 2 cm = 1 at = 10 000 $\frac{kg}{qm}$ = 10 000 $\frac{kg}{m^2}$. Die Fläche unter der Kurve gibt bekanntlich Arbeiten an, der Maßstab folgt aus 5 cm · 2 cm = 1 m^3 · 10 000 $\frac{kg}{m^2}$; 10 qcm = 10 000 $\frac{m^3 \cdot kg}{m^2}$; 1 qcm = 1000 m·kg.

6. **Technische Einheiten.** Endlich sei noch bemerkt, daß in technischen Rechnungen nicht alle Einheiten auf die Grundmaße zurückgeführt sind; es sind eine Reihe von anderen Einheiten in Gebrauch. So gibt eine Dampf-

maschine, die eine Stunde lang eine Pferdestärke entwickelt, eine Arbeit her, die man wohl als Pferdekraftstunde bezeichnet und als Arbeitseinheit annimmt. Man kann für sie die Dimension [PS · Std.] einführen und mit dieser Dimension verfahren, wie mit denen, die aus Grundeinheiten unmittelbar zusammengesetzt sind. Als Beispiel für die Bequemlichkeit und Sicherheit, die auch hier das Rechnen mit Dimensionen gewährt, diene die Umrechnung dieser Einheit in die frühere Arbeitseinheit, das Meterkilogramm und weiterhin in Wärme-Einheiten.

Es ist

$$1\ [\mathrm{PS}] = 75\left[\frac{\mathrm{m\cdot kg}}{\mathrm{sec}}\right];$$

$$1\ [\mathrm{PS\cdot Stde}] = 75\left[\frac{\mathrm{m\cdot kg}}{\mathrm{sec}}\cdot \mathrm{Stde}\right] = 75\left[\frac{\mathrm{m\cdot kg}}{\mathrm{sec}}\cdot 3600\ \mathrm{sec}\right]$$

$$= 75\cdot 3600\left[\frac{\mathrm{m\cdot kg}}{\mathrm{sec}}\cdot \mathrm{sec}\right];$$

$1\ [\mathrm{PS\cdot Stde}] = 270\,000\ [\mathrm{m\cdot kg}]$. Wir wissen weiter, daß $1\ [\mathrm{m\cdot kg}] = \frac{1}{424}\ [\mathrm{WE}]$; durch Einsetzen haben wir $1\ [\mathrm{PS\cdot Stde}] = 270\,000\ [\frac{1}{424}\ \mathrm{WE}] = 736\ [\mathrm{WE}]$.

Übrigens können wir noch in der Formel $1\ \mathrm{PS\cdot Stde} = 736\ \mathrm{WE}$ beiderseits mit Stde dividieren und haben auch $1\ \mathrm{PS} = 736\ \frac{\mathrm{WE}}{\mathrm{Stde}}$.

7. **Technische und physikalische Grundeinheiten.** Als Grundeinheiten sind in der Technik, wie erwähnt, das Meter, das Kilogrammgewicht und die Sekunde üblich. Die Physik verwendet statt dessen meist das Centimeter, die Gramm-Masse und die Sekunde (c·g·s-System). Auf die Umrechnung von Angaben eines Maßsystems ins andere gehen wir nicht ein, heben nur hervor, daß im technischen System das Kilogramm die Einheit des Gewichtes, der Kraft ist; die Masseneinheit folgt aus der Formel Masse = Gewicht : Schwerebeschleunigung $= 1\ \mathrm{kg} : 9{,}81\ \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{sec}^2}$; die Masseneinheit ist also $\frac{1}{9{,}81}\left[\frac{\mathrm{kg\cdot sec^2}}{\mathrm{m}}\right]$. Im c·g·s-System aber ist das Gramm die Masseneinheit. Wegen der Formel Kraft = Masse · Beschleunigung $= \mathrm{gr}\cdot 981\ \frac{\mathrm{cm}}{\mathrm{sec}^2}$ ist also die Krafteinheit $981\left[\frac{\mathrm{gr\cdot cm}}{\mathrm{sec}^2}\right]$, bisweilen Dyn genannt.

Man sieht, daß im technischen Maßsystem die Masseneinheit keine glatte Zahl und ihre Dimension ein zusammengesetzter Ausdruck ist; im physikalischen System ist dasselbe für die Krafteinheit der Fall. Das darf man bei Umrechnungen nicht übersehen.

II. Auswertung.

8. **Übliche Fehler bei der Auswertung. Prozentrechnungen.** Bei Angaben in Prozenten kommen oft Fehler in die Rechnung; so einfach die Sache an sich ist, wird es doch lohnen, kurz darauf hinzuweisen. Man hat gut darauf zu achten, in Prozenten von welcher Größe die Angabe gemacht ist. Wenn wir in einem Aufsatz aus berufenster Feder lesen: der Betrieb mit Spiritus kostet 12 Pfg. für die Pferdekraft-Stunde $= \frac{12 \text{ Pfg.}}{\text{PS} \cdot \text{Stde.}}$, der Benzinbetrieb nur $\frac{8 \text{ Pfg.}}{\text{PS} \cdot \text{Stde.}}$, „letzterer sei also 50 % billiger", so ist das falsch. Jeder, der hört, Spiritusbetrieb koste 12 Pfg. und Benzinbetrieb sei 50 % billiger, rechnet 6 Pfg. für den Benzinbetrieb heraus. Richtig sind die Folgerungen: Benzinbetrieb ist $33^1/_3$ % billiger, oder aber: Spiritusbetrieb ist 50 % teurer als der andere; diese beiden Folgerungen sagen, trotz der verschiedenen Zahlen, das gleiche aus. Einmal bezieht man die Prozentrechnung auf 12 Pfg., einmal auf 8 Pfg. als 100 %.

Braucht man 100 Pferdestärken, und hat die zu verwendende Maschine einen Wirkungsgrad von 60 %, gehen also 40 % in ihr verloren, so hat man der Maschine nicht $100 + 40 = 140$ PS zuzuführen, sondern $\frac{100}{0{,}6} = 166{,}7$ PS. Wirkungsgrad und Verlust gibt man nämlich in Prozenten der eingeführten Energiemenge an, nicht der herausgehenden.

Braucht eine Dampfmaschine 200 kg Dampf in der Stunde, und schätzt man den Verlust durch Kondensation in der Rohrleitung auf 10 %, so muß der Kessel nicht 220 kg, sondern $\frac{200}{0{,}9} = 222{,}2$ kg Dampf erzeugen. Die Angabe der Kondensationsverluste pflegt nämlich in Prozenten der erzeugten Dampfmenge zu geschehen, nicht der ankommenden.

9. **Einfache, quadratische und andere Mittelwerte.** Fehler meist freilich von geringerer Tragweite laufen beim Bilden von Mittelwerten unter. Um den Inhalt eines zylindrischen Gefäßes zu bestimmen, würden wir seine Höhe messen, außerdem den lichten Durchmesser. Da nun das Gefäß ungenau hergestellt ist, so wird der Durchmesser nicht überall genau derselbe sein; wir messen also eine Reihe von Durchmessern, etwa von 20 zu 20 cm Höhe, berechnen den mittleren Durchmesser, und dann den Inhalt $V = \frac{d_m^2 \pi}{4} \cdot h$. Dieses Verfahren ist mathematisch falsch, und als praktische Näherungsmethode nur dann brauchbar, wenn die einzelnen gemessenen Durchmesser nicht sehr voneinander abweichen. Das richtige, aber umständlichere Verfahren ist es, aus jedem gemessenen Durchmesser d die

Fläche $f = \frac{d^2\pi}{4}$ zu bilden, das Mittel f_m aus diesen Flächen zu berechnen und nun das Volumen $V = f_m \cdot h$ zu finden. Ein anderes, bisweilen bequemeres Verfahren ist es, den quadratischen Mittelwert der Durchmesser zu bilden — dieser Ausdruck ist aus der Wechselstromtechnik übernommen — und zur Berechnung der mittleren Fläche zu verwenden. Der quadratische Mittelwert ist die Wurzel aus dem Mittel der Quadratwerte. Ein Beispiel wird ihn erläutern und zugleich zeigen, wie groß der bei der üblichen Näherungsrechnung gemachte Fehler wird.

Ein Gefäß habe 140 cm Höhe, und sei auf 100 cm Durchmesser gearbeitet; die Messung in 6 Höhenabständen von je 20 cm habe aber die Durchmesser 100, 101, 103, 102, 99, 97 cm ergeben.

Übliches Verfahren: Mittel der Durchmesser 100,33; also mittlere Fläche 7905,8 qcm. Der Inhalt des Gefäßes bei 140 cm Höhe ist 11068,1 l.

Genaues Verfahren: Die Kreisinhalte zu den gemessenen Durchmessern sind 7854,0, 8011,8, 8332,3, 8171,3, 7697,7, 7389,8 qcm; Mittel aus diesen: 7909,5 qcm. Der Inhalt des Gefäßes bei 140 cm Höhe ist 11073,3 l.

Verfahren mit quadratischem Mittelwert, ebenfalls genau: Die Quadratzahlen der gemessenen Durchmesserwerte sind 10000, 10201, 10609, 10404, 9801, 9404; deren Mittelwert ist 10070,7. Der quadratische Mittelwert der Durchmesser ist $\sqrt{10070{,}7} = 100{,}35$ cm. Hiermit findet man die mittlere Fläche zu 7909,5 qcm, den Inhalt des Gefäßes zu 11073,3 l, wie beim vorigen Verfahren.

Von den beiden genauen Verfahren ist das erste bequemer, wenn man eine Tabelle der Kreisinhalte zur Hand hat, sonst aber das zweite. Beide haben also ihre Berechtigung. Übrigens sieht man aber, daß das übliche Näherungsverfahren einen um nur 5,2 l = 0,045 % zu kleinen Wert liefert, trotzdem die einzelnen gemessenen Durchmesser bis zu 3 % nach oben und unten von ihrem Mittelwert abwichen. Das Näherungsverfahren ist viel bequemer, und meist genügend genau, solange die gemessenen Abweichungen unter 10 % bleiben. Bei größeren Abweichungen muß man die genauen Verfahren anwenden.

10. Den Grund dafür, daß das eben besprochene Näherungsverfahren nur angenähert ist, erkennen wir in der Tatsache, daß die gemessene Größe — der Durchmesser — und die zu berechnende — der Kreisinhalt oder der Inhalt des Gefäßes — nicht linear voneinander abhängig sind. Der Gefäßinhalt ist vom Quadrat des Durchmessers abhängig: die Beziehung zwischen beiden wird durch eine Parabel nicht durch eine Gerade dargestellt. Innerhalb enger Grenzen können wir aber die Parabel durch eine Gerade ersetzen.

Wo nichtlineare Beziehungen vorkommen, darf man nur dann mit einfachen Mittelwerten rechnen, wenn die Abweichungen der gemessenen Größen voneinander nicht allzu groß werden. Bei der Messung von

Wassermengen durch Ausflußöffnungen (82) und in anderen Fällen werden wir hierauf achten müssen. Dort werden wir auch im Wurzelmittelwert ein Analogon zum quadratischen Mittelwert kennen lernen, und ähnlich sind kubische, logarithmische usw. Mittelwerte denkbar.

11. **Mittelwert bei Produkten.** Wo eine Größe a als Produkt zweier andern gefunden wird: $a = b \cdot c$, bildet man ebenfalls oft den Mittelwert aller b, den wir mit $M(b)$ bezeichnen wollen; man bildet ebenso $M(c)$, und glaubt durch Multiplizieren beider den Mittelwert von a zu finden: $M(a) = M(b) \cdot M(c)$. So verfährt man, wenn man die mittlere elektrische Leistung während längerer Zeit aus den Ablesungen von Spannung und Stromstärke findet (§ 146), oder beim Auswerten von Indikatordiagrammen (§ 153). Mathemathisch ist der Mittelwert der Produkte nicht gleich dem Produkt der Mittelwerte, es ist $M(bc) \gtrless M(b) \cdot M(c)$. Auch hier ist das übliche Verfahren ein brauchbares Näherungsverfahren nur so lange, wie die abgelesenen Einzelwerte nicht zu sehr voneinander abweichen; 10 % Abweichung der Ablesungswerte voneinander, d. h. $\pm$ 5 % vom Mittelwert ist auch hier oft die zulässige Grenze, die mindestens von einem der beiden Faktoren b oder c innegehalten werden muß.

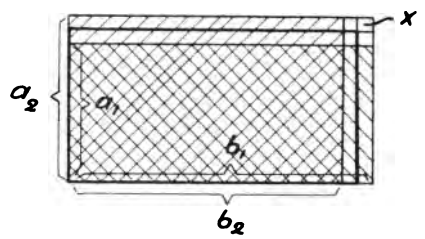


Fig. 2.

Man erkennt den Fehler, den man durch die einfachere Rechnungsweise begeht, aus Fig. 2. Der Inhalt der beiden schraffierten Rechtecke ist $a_1 \cdot b_1$ und $a_2 \cdot b_2$. Das Mittel aus beiden finden wir, indem wir die starken Geraden mitten zwischen die anderen legen; der Inhalt des stark umfahrenen Rechtecks ist aber nicht genau der Mittelwert aus den beiden anderen: wir haben die kleine Fläche x vernachlässigt.

12. **Verallgemeinerung: Beharrungszustand der Maschinen.** Was wir für einzelne Ablesungen als richtig erkennen, gilt ebenso für ganze Versuchsreihen. Man liest an einer Maschine während längerer Zeit die verschiedensten Größen ab, bildet die Mittelwerte und nimmt an, daß man auf diese Weise zueinander passende Angaben erhält. Richtig ist diese Annahme nur, wenn alle gemessenen Größen in linearer Beziehung zueinander stehen; genügend genaue Resultate erhält man, wenn jede der gemessenen Größen nur wenig geschwankt hat, so daß man in diesen engen Grenzen linearen Verlauf annehmen kann.

Bei Dauerversuchen muß also die Maschine annähernd im Beharrungszustande sein. Ist das unmöglich zu erreichen (Abkühlungsversuche bei Kälteanlagen), so kann man unter Umständen durch Abkürzen der Versuchsdauer die Ergebnisse verbessern, weil man den Beharrungszustand besser annähert, oder man muß feststellen, wie die sich ändernde Größe

von den übrigen abhängt, und innerhalb welcher Grenzen man diese Abhängigkeit als linear ansehen kann.

13. **Mit wieviel Stellen rechnen? Differenzmethoden.** Schwierig und doch wichtig ist die Beantwortung der Frage, wie genau Ablesungen zu machen sind, wieviel Stellen also man bei den Ablesungen und Rechnungen verwenden soll, und wie weit man Korrektionen ausführen solle. Bei den sehr umfangreichen Zahlenrechnungen, die bei technischen Versuchen vorkommen, vermeidet man gerne unnützen Ballast, zumal bei allen Versuchen die Ergebnisse durch Zufälligkeiten, wie Schmierung der Lager und Reibung in Stopfbüchsen, beeinflußt werden. Es hat offenbar keinen Zweck, die Genauigkeit der Ergebnisse so weit zu treiben, daß diese Zufälligkeiten sich schon bemerkbar machen. Andererseits wäre es falsch, alle Ablesungen bei einem Verdampfungsversuch am Dampfkessel nur bis auf 5 % genau, also nur zweistellig zu machen, weil man weiß, daß das Endergebnis doch um 5 % unsicher bleiben wird. Um vielmehr diese Genauigkeit im Endergebnis zu erzielen, muß man die ersten Ablesungen viel genauer machen. Sonst kommt ein Prozent zum andern, wie man zu sagen pflegt. Ebenso falsch wäre es, beim Dampfverbrauchsversuch an einer Dampfmaschine für die Wassermessungen ebenso große Ungenauigkeiten zuzulassen, wie man beim Indizieren, wegen der Mangelhaftigkeit des Indikators, leider zulassen muß.

Im allgemeinen werden folgende Regeln einen Anhalt geben: Man mache die ersten Ablesungen an den Instrumenten so genau, wie die Instrumente es zulassen. Korrektionen an diesen Ablesungen bringe man an, wenn sie das Endergebnis um $^1/_4$ bis 1 % beeinflussen, je nach dem Zweck der Untersuchung. Bei den einzelnen Instrumenten werden wir nach Möglichkeit Zahlenbeispiele für solche Korrektionen geben. Die Korrektion kann man fast immer in Bausch und Bogen ermitteln, auf zwei oder selbst nur eine Stelle. Bei der weiteren Rechnung benutzt man anfangs die untere Skala des Rechenschiebers, bei den späteren Zahlen aber, auf die sich keine weiteren Rechnungen aufbauen, die obere, und liest ab soweit man kann. Bei besonders sorgfältigen Versuchen kann die Verwendung des großen Rechenschiebers von 50 cm Länge nicht unnütz sein, namentlich für die ersten, grundlegenden Rechnungen.

Besondere Genauigkeit muß man anstreben, wo die gesuchte Größe als Differenz zweier wenig voneinander verschiedener Zahlen gefunden werden soll, also bei Differenzmethoden. So ermittelt man etwa die Reibungsverluste einer Dampfmaschine als Differenz aus indizierter Leistung N_i und gebremster N_e. Ist $N_i = 100$ PS und $N_e = 90$ PS, so ist der Reibungsverlust 10 PS. Hat man N_i und N_e auf etwa 1 % genau ermittelt, sind aber zufällig die Fehler nach entgegengesetzter Richtung gefallen, so werden wir $N_i = 101$ PS und $N_e = 89$ PS statt der wahren Werte gefunden haben. Daraus entnehmen wir den Reibungsverlust $101 - 89 = 12$ PS,

also um 20 % falsch. Aus den kleinen Fehlern ist ein verhältnismäßig viel größerer geworden.

Im Gegensatz dazu darf man diejenigen Zahlen mit geringerer Sorgfalt ermitteln, welche zu einer viel größeren hinzugezählt werden. Der Fehler tritt dann zurück gegenüber der größeren Zahl. Deshalb forderten wir oben für Korrektionen nur geringe Sorgfalt.

14. **Nicht zu viele Stellen.** Gegen das Mitschleppen zu vieler Stellen, das namentlich bei Anfängern beliebt ist, sprechen noch folgende Unsicherheiten in den physikalischen Grundlagen: Die Angaben für das mechanische Wärmeäquivalent schwanken zwischen 424 und 430 m/kg für die Wärmeeinheit, also um $1^1/_4$ %. Obgleich 428 heute als wahrscheinlicher Wert gilt, rechnet man nach Zeuners und der Hütte Vorgang mit 424, einem älteren Wert, für den die Tabellen einmal aufgestellt sind. Die Ergebnisse werden also um 1 % falsch. — Die spezifische Wärme des überhitzten Wasserdampfes nimmt man $c_p = 0{,}48$ an. Tatsächlich scheint sich der Wert mit der Temperatur sehr zu ändern, und zwar von 0,43 bis 0,53, das Gesetz der Änderung ist aber unsicher. — Die spezifische Wärme der Gase nimmt man als konstant an, nach Mallard und Le Chatelier soll sie aber von der Temperatur stark abhängig sein. Werden auch deren Angaben bezweifelt, so sind sie doch noch nicht widerlegt. Die Frage nach der spezifischen Wärme der Gase ist noch nicht gelöst. — Für Versuche an Kältemaschinen insbesondere beruhen alle die Rechnungen auf sehr unsicheren Grundlagen, welche die Beziehung zwischen Druck und Temperatur der gesättigten Dämpfe von SO_2 und NH_3, ja selbst von CO_2 benutzen, oder welche die Verdampfungswärmen der genannten Stoffe einführen. Diese Zahlen sind nur mangelhaft bekannt, und namentlich nicht bis zu so hohen Temperaturen, wie sie technisch gebraucht werden.

Wie man sieht, liegen die Unsicherheiten der Rechnung hauptsächlich in den Wärmewerten. Bei rein mechanischen Vorgängen pflegen die mangelhaften Meßmethoden — namentlich Wasser- und Luftmessung, Bremsung, Indizierung — Ungenauigkeiten von ähnlichen Beträgen in die Rechnung zu bringen. Das wird bei den einzelnen Methoden zu besprechen sein.

15. **Graphische Darstellung (Schaubild).** Das Ziel irgend welcher Messungen kann ein zweifach verschiedenes sein.

Entweder man will das Verhalten des untersuchten Gegenstandes, sagen wir einer Maschine, bei einem bestimmten Zustande feststellen. Das ist der Fall, wenn man den Dampfverbrauch einer Dampfmaschine bei einer bestimmten vorgeschriebenen Belastung nachprüft, ob er etwa den Garantiebedingungen entspricht. Ein Einzelversuch führt hier nur zu unsicherem Resultat: man macht deshalb mehrere Versuche, ohne irgend etwas an den äußeren Bedingungen zu ändern, und nimmt den Mittelwert. Daran, wie weit die Einzelversuche vom Mittel abweichen, hat man einen Maßstab für die Genauigkeit des Resultats. Die Mathematik weist bei der Lehre von

der Methode der kleinsten Quadrate die Richtigkeit dieses Verfahrens nach und gibt auch im wahrscheinlichen Fehler das Maß für die Genauigkeit des Resultats numerisch an. Bei technischen Versuchen kann man von diesen mathematischen Hilfsmitteln zu selten Gebrauch machen, als daß es lohnte, sie zu besprechen.

Im anderen Fall ist die Aufgabe die, das Verhalten des untersuchten Gegenstandes bei Änderung einer der Versuchsbedingungen zu ermitteln.

Bremsung eines Elektromotors.

	N_{el}	N_b	η
a	1,1	Leerlauf	0
b	3,0	1,9	0,63
c	6,0	4,7	0,78
d	9,0	7,4	0,82
e	12,0	9,8	0,81

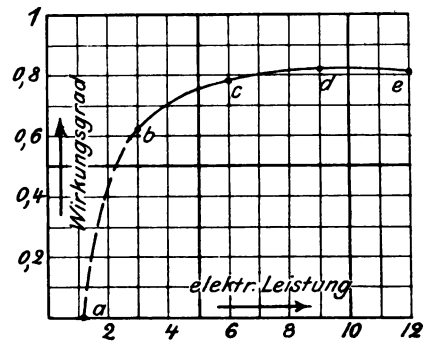


Fig. 3.

So will man feststellen, wie sich Tourenzahl, Wirkungsgrad u. dgl. ändert bei variabler Belastung eines Motors. In diesem Fall läßt sich das Versuchsresultat nicht durch eine Einzelzahl ausdrücken, sondern durch eine Tabelle oder besser durch eine graphische Darstellung, ein Schaubild. Im Schaubild trägt man als Abszissen wagerecht diejenige Größe ein, welche man künstlich geändert hatte, als Ordinate die gesuchte, und erhält als Ergebnis jedes Einzelversuches einen Punkt (Fig. 3 und Tabelle). Indem man durch diese Punkte einen glatten Kurvenzug hindurchlegt, erhält man als Resultat der ganzen Versuchsreihe eben diese Kurve. Dabei werden stets die Punkte so unregelmäßig liegen, daß man eine glatte Kurve nicht durch sie hindurchlegen kann, das würde sonst eine Schlangenlinie geben. Man legt die Kurve so, daß die Punkte möglichst gleichmäßig zu ihren beiden Seiten verteilt sind.

Dieses Verfahren, die Kurve glatt durch die Punkte hindurchzulegen, ist nicht etwa als ein unerlaubtes Mittel zur Verschönerung des Ergebnisses anzusehen. Die unregelmäßige Lage der Punkte rührt von den Messungsungenauigkeiten her und hat nicht im Verhalten der Maschine seine Begründung. Zieht man die Kurve glatt hindurch, so merzt man die zufälligen Fehler aus und erhält die nach den Versuchen wahrscheinlichste Darstellung des Ergebnisses.

16. **Unsicherheiten dabei.** Es ist Sache des geschulten Taktgefühls, die Kurve geschickt durch die Punkte hindurchzulegen. Die Versuchsresultate

werden dadurch wesentlich beeinflußt, wenn man sich bei den kostspieligen technischen Messungen mit einer geringen Zahl von Punkten begnügen muß. Oft kann man die Unsicherheit in dieser Hinsicht vermindern durch Änderung der dargestellten Größen.

Wer je die Wirkungsgradkurve eines Elektromotors, Fig. 3, aufgestellt hat, weiß, wie unsicher er über den Verlauf des unteren punktierten Astes war. Stellt man aber in Fig. 4 die abgebremste Leistung als Funktion der elektrisch eingeführten dar, so herrscht diese Unsicherheit nicht, weil diese Kurve fast geradlinig verläuft. Und nun kann man aus Fig. 4 noch einige Punkte für den unteren Ast der Wirkungsgradkurve berechnen, die durch Versuch nicht gut festzustellen sind, und hat auch den unteren Ast sicher.

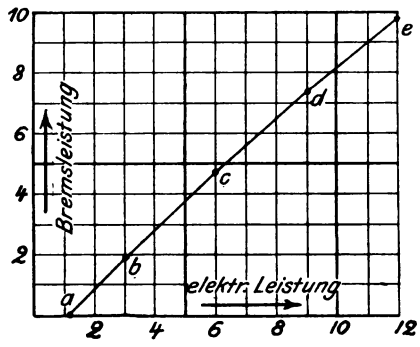


Fig. 4.

17. **Änderung der äußeren Bedingungen; isometrische Darstellung.** Es ist selbstverständlich, daß man bei einer Versuchsreihe wie der eben besprochenen immer nur eine Größe, diesmal die Bremsleistung, willkürlich ändern darf. Die anderen Bedingungen, Erregung, Spannung, müssen konstant gehalten werden. Wollte man bei einer zweiten Versuchsreihe den Einfluß verschiedener Erregung studieren, so hätte man diesmal die Bremsleistung konstant zu halten und das Resultat natürlich in einem anderen Schaubild darzustellen.

Gelegentlich kann man freilich den gegenseitigen Einfluß dreier Größen aufeinander, also etwa das Verhalten des Elektromotors, wenn man Belastung und Netzspannung gleichzeitig ändert, graphisch darstellen. Dazu dient die isometrische Darstellungsmethode, zu der man in der Z. V. d. I. 1904, S. 622, 672 Beispiele findet.

III. Eigenschaften der Instrumente.

18. **Anforderungen.** Im allgemeinen stellt man an technische Meßinstrumente und Meßmethoden andere Anforderungen als an physikalische. Bei letzteren ist fast immer die Erreichung der größtmöglichen Genauigkeit das maßgebende Ziel. Bei technischen Messungen tritt dieser Gesichtspunkt, aus Gründen die wir in den vorigen Paragraphen andeuteten, zurück. Das Haupterfordernis ist, die Ablesungen schnell zu machen. Das ist wünschenswert wegen der großen Anzahl von Ablesungen, und nötig, weil es sich fast immer um Feststellung schwankender Größen handelt.

19. **Unrichtige Gangart; Eichung; Korrektionen.** Wir wollen die wichtigsten Eigenschaften der Meßinstrumente am Beispiel der Federwage erläutern, die wir als bekannt voraussetzen können. Wir prüfen die Federwage, indem wir in verschiedener Reihenfolge Gewichte an den Haken hängen, und die Angabe des Zeigers ablesen. Dabei achten wir darauf, daß wir die Gewichte vorsichtig, stoßfrei anhängen und abnehmen.

Bei einer vollkommenen Federwage würde die Skala so viel anzeigen, wie am Haken hängt. Wenn wir in Fig. 5 die Angabe des Zeigers als Abszissen und die am Haken hängende Last als Ordinaten auftragen, so werden wir eine unter 45° geneigte Gerade erhalten.

Im allgemeinen aber wird schon nach kurzem Gebrauch die Teilung der Skala falsch sein: Wenn wir z. B. 20 kg an den Haken hängen, so wird die Federwage 20,3 kg anzeigen. Tragen wir diese Werte und die

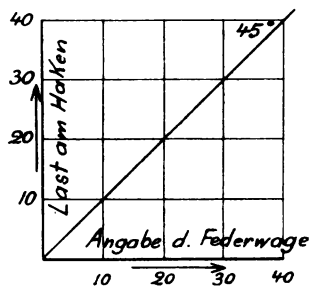


Fig. 5.

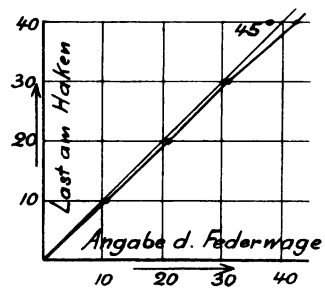


Fig. 6.

entsprechenden bei anderen Lasten in ein Achsenkreuz ein, so erhalten wir ein Bild wie Fig. 6: Die Kurve, die wir als Charakteristik des Instruments bezeichnen können, weicht von der 45°-Linie ab; letztere ist zum Vergleich eingetragen. Die Charakteristik liegt unter der 45°-Linie, wenn das Instrument zu viel anzeigt, und umgekehrt.

Wenn ein Instrument in dieser Weise falsch zeigt, so ist das kein Schaden. Man braucht nur seine Charakteristik zu kennen, um aus den abgelesenen Werten die richtigen zu ermitteln. Man muß also die Charakteristik durch einen Vorversuch feststellen, den man als Eichung des Instruments bezeichnet. Die Eichergebnisse berücksichtigt man durch Anbringung einer Korrektion an den abgelesenen Werten.

20. **Unempfindlichkeit durch Reibung.** Das Falschzeigen eines Instrumentes macht es also nicht im mindesten unbrauchbar. Anders ist es mit der Eigenschaft, die wir als Ungenauigkeit oder Unempfindlichkeit bezeichnen. Mit diesen Namen belegt man die Eigenschaft des Instrumentes, beim Aufgang anders zu zeigen als beim Abwärtsgang. Belastet man eine Federwage mit 20 kg, so möge sie 20,3 an der Skala angezeigt haben. Hängt man aber erst 21 kg an den Haken, und entfernt — immer stoßfrei — 1 kg davon, so hängen wieder 20 kg am Haken, diesmal bleibt

aber der Zeiger auf 20,7 stehen, höher als das erste Mal. Der Unterschied von 0,4 zwischen beiden Ablesungen rührt von der Reibung her: ohne Reibung würde sich der Zeiger stets auf 20,5 einstellen. Durch Erschütterung des Instrumentes beseitigt man die Reibung ganz oder teilweise.

Die Reibung hat also zur Folge, daß wir die am Haken hängende Last um 0,4 kg ändern können, ohne daß der Zeiger eine Änderung anzeigt: daher der Name Unempfindlichkeit für diese Eigenschaft des Instruments; oder aber: die Reibung hat zur Folge, daß wir bei einer gewissen Angabe des Zeigers über die Last am Haken innerhalb eines Spielraumes von 0,4 kg unsicher sind: daher der Name Ungenauigkeit für die gleiche Eigenschaft.

21. **Abhängigkeit vom vorherigen Zustand.** Nun kann aber noch ein anderer Fall eintreten, die Angabe des Instruments kann von seinem vorhergehenden Zustand abhängig sein.

Wenn wir die eben als Beispiel benutzte Federwage nicht nur bis 21 kg belasten, sondern 40 kg einen Augenblick an den Haken hängen und dann 20 kg vorsichtig wieder entfernen, so bleibt der Zeiger diesmal auf 20,9 stehen; vorhin zeigte er ebenfalls im Abwärtsgang 20,7. Hatten wir die Wage längere Zeit mit 40 kg belastet und entlasten vorsichtig auf 20 kg, so bleibt der Zeiger sogar auf 21,2 stehen. Bei solcher Wage würde also sowohl die Größe der vorher angehängten Last als auch die Zeitdauer ihrer Wirksamkeit Einfluß auf die Angabe haben.

Diese Unregelmäßigkeiten rühren davon her, daß die Feder, der wirksame Teil der Federwage, über die Elastizitätsgrenze hinaus beansprucht war. Sie halten sich bei guten Instrumenten in engen Grenzen, sind durch Erschütterung nicht oder doch nicht ganz zu beseitigen.

22. **Trägheit.** Die erwähnten Eigenschaften sind Fehler der Federwage, die sich ähnlich an anderen Instrumenten wiederfinden. Eine Eigenschaft des Instruments, die man nicht als Fehler bezeichnen kann, sondern die je nach dem Verwendungszwecke angenehm oder unbequem ist, ist die Trägheit.

Ist die zu messende Größe nicht konstant, sondern schwankt ihr Wert schnell hin und her, so wird kein Instrument diesen Schwankungen ganz folgen können; jedes wird nachhinken. Es sind nun zwei Fälle möglich. Entweder wir wollen die Schwankungen selbst studieren, das Gesetz kennen lernen, nach dem dieselben verlaufen, vielleicht ihren Verlauf mechanisch aufzeichnen lassen. Dann muß das Meßinstrument ihnen möglichst gut folgen; dazu macht man die Masse der bewegten Teile möglichst klein und verringert so die Trägheit des Instruments. Oder aber man will den mittleren Betrag der zu messenden Größe haben. Dann ist ein sehr träges Instrument bequem, welches die Schwankungen nicht anzeigt, sondern sich auf den Mittelwert fast ruhig einstellt. — Man kann die Trägheit der Instrumente nur bis auf ein gewisses Maß ver-

kleinern durch Verringern der bewegten Massen. Man kann sie aber beliebig vergrößern durch Anbringen von Flüssigkeitsbremsen, die das Triebwerk nicht an langsamer, wohl aber an schneller Bewegung hindern. Bei Manometern z. B. drosselt man einfach den Manometerhahn ab. Reibung im Triebwerk bringt den Zeiger zwar auch zur Ruhe, ist aber schädlich, weil sie ihn auch an langsamer Bewegung hindert. Sie macht das Instrument nicht träge, sondern unempfindlich.

Auch das Thermometer ist träge, es folgt schnellen Temperaturschwankungen nicht. Hier rührt die Eigenschaft davon her, daß die Wärme Zeit braucht, um sich dem Quecksilber mitzuteilen.

Wenn die Schwankungen langsam verlaufen und wenn das Instrument so wenig träge ist, daß es den Schwankungen im wesentlichen folgt, so wird es doch immer etwas nachhinken. Bei allen Instrumenten können dann periodische Schwingungen auftreten, die den Massenschwingungen des Indikators entsprechen, über deren Verlauf man sich im Kapitel über Indikatoren unterrichten kann (§ 163).

23. **Skalen- und Ausgleichinstrumente.** Die Angaben der letzten Paragraphen bezogen sich auf Skaleninstrumente, das sind solche, die den Momentanwert irgend einer Größe an einer Skala abzulesen gestatten. Unter den technischen Instrumenten nimmt diese Gattung den größten Raum ein, weil sie am bequemsten ist.

Die gewöhnliche Wage, die Dezimalwage, und manche andere Instrumente kann man als Ausgleichinstrumente bezeichnen: das zu messende Gewicht wird durch Gewichtsstücke auf der anderen Schale ausgeglichen; die Ablesung erfolgt, nachdem man durch Probieren die Zunge zum Einspielen gebracht hat.

Die Ausgleichinstrumente eignen sich nicht zum Messen schwankender Größen. Den Begriff der Trägheit kann man daher nicht auf sie übertragen. Auch von einer Eichung im Sinne wie bei Skaleninstrumenten kann man bei ihnen nicht sprechen: eine Wage hat das vorgeschriebene Hebelverhältnis genau, oder in gewissem Betrage falsch. Der Fehler ist aber der gleiche für alle Belastungen, wenn nicht unzulässig starke Deformationen auftreten. Dagegen kann man von Empfindlichkeit genau so sprechen wie bei Skaleninstrumenten.

24. **Totalisierende Instrumente.** Eine weitere Gattung von Instrumenten können wir unter dem Namen „integrierende oder totalisierende Instrumente“ zusammenfassen. Gas- und Wassermesser, Tourenzähler geben nicht den augenblicklichen Wert irgend einer Größe, etwa die momentane Wasserlieferung, die momentane minutliche Tourenzahl an, sondern sie zeigen, wieviel Wasser im ganzen durch den Messer gegangen ist, wieviel Touren die Maschine im ganzen gemacht hat.

Bei dieser Art von Instrumenten schadet eine falsche Angabe nichts, ebensowenig wie bei Skaleninstrumenten. Nur hat eine Eichung fest-

zustellen, wieviel das Instrument zu viel oder zu wenig anzeigt. Für Maschinenuntersuchungen im Beharrungszustande kann man die Eichung bei der Geschwindigkeit vornehmen, mit der das Instrument gebraucht wird. Wo aber ein integrierendes Instrument im langsamen und schnellen Gang gebraucht wird, da ist zu fordern, und durch Eichung zu prüfen, daß die Angabe bei allen Gangarten um gleich viel von der richtigen Angabe abweiche, daß also der anzuwendende Korrektionsfaktor für alle Gangarten der gleiche sei.

Wo man eine Größe mittels eines integrierenden oder auch mittels eines Skaleninstruments festzustellen in der Lage ist — man kann die minutliche Tourenzahl einer Maschine mit Zählwerk oder mit Tachometer messen — da ist die Auswahl des Instruments nicht immer gleichgültig. Das integrierende Zählwerk zeigt nämlich Tourenschwankungen nicht an, dafür kann man aber durch Ausdehnung der Ablesungsdauer sehr große Genauigkeit erzielen. Das Tachometer hat den Vorteil momentaner Ablesung und läßt daher die Geschwindigkeitsschwankungen erkennen. Beide Instrumente ergänzen sich also. Übrigens sind nicht immer die integrierenden Methoden die genaueren.

25. **Kritik der Eigenschaften.** Zur Kritik der einzelnen Fehler eines Instruments dient also etwa das Folgende. Unrichtige Teilung der Skala ist kein Schaden, sondern kann durch Eichung des Instrumentes und Anbringen der ermittelten Korrektion an der Ablesung unschädlich gemacht werden. Reibung und die Eigenschaften der Materialien bewirken bei den meisten Instrumenten einen Unterschied zwischen der Angabe bei Aufwärtsgang und der bei Abwärtsgang. Sind diese Unterschiede gering, oder durch Erschüttern des Instrumentes zu beseitigen, so beeinträchtigen sie die Genauigkeit; sind die Unterschiede groß, so machen sie das Instrument unbrauchbar. Trägheit ist bisweilen erwünscht, bisweilen macht sie das Instrument unbrauchbar.

Man mache es sich zur Regel, nur mit brauchbaren guten Instrumenten zu arbeiten. Keine Korrektion kann die Fehler eines schlechten Instruments unschädlich machen. Insbesondere versuche man nie, die Reibung durch Korrektion unschädlich zu machen. Ihr Betrag ist schwankend, und man weiß selten sicher, ob das Instrument aufwärts- oder abwärtsgehend in seine Lage gelangt ist. Es ist aber eine gute Regel, Korrektionen nur dann anzubringen, wenn sie sicher eine Verbesserung bedeuten.

26. **Ausführung von Eichungen, Darstellung der Ergebnisse.** Die Eichung eines Skaleninstruments besteht nach dem früher Gesagten darin, daß man die Richtigkeit seiner Angabe prüft, oder feststellt, wieviel seine Angabe vom wahren Wert abweicht. Große Abweichungen zwischen Aufwärtsgang und Abwärtsgang sind unzulässig. Bei kleinen nimmt man das Mittel aus beiden. Das Ergebnis der Eichung können wir in Form eines Linienzuges graphisch darstellen, den wir als Charakteristik bezeichneten.

Wir tragen dazu die Angaben des zu prüfenden Instruments als Abszissen, die wahren Werte, also etwa die Angaben eines Normalinstruments, als Ordinaten auf. Der entstehende Linienzug ist eine Gerade unter 45°, wenn das Instrument richtig zeigt, sonst weicht er von dieser Geraden ab (Fig. 7). Hat man mit dem so geeichten Instrument eine Ablesung gemacht, so braucht man nur in der Charakteristik diesen abgelesenen Wert $0a$ als Abszisse aufzusuchen, die zugehörige Ordinate ab ist der wahre Wert, mit dem man statt des abgelesenen zu rechnen hat.

Sehr viel besser ist die Darstellung der Eichergebnisse in einer anderen Form, wenn man nämlich als Ordinaten nicht die wahren Werte, sondern die anzuwendenden Korrektionen aufträgt. Die Korrektion ist der Betrag, den man zum abgelesenen Wert zuzählen muß, um den wahren zu erhalten; in Fig. 7 wäre also cb die zum Ablesungswert $0a$ gehörige Korrektion. Die Korrektion ist die negativ genommene Abweichung der Instrumentenangabe vom wahren Wert. Da die Korrektionen kleine Werte sind, so kann man sie in größerem Maßstab auftragen als die Ablesungswerte, etwa im zehnfachen Maßstab; dadurch eben wird die Benutzung dieser Darstellungsart viel bequemer. Fig. 8 gibt die Resultate der Fig. 7 in solcher Form.

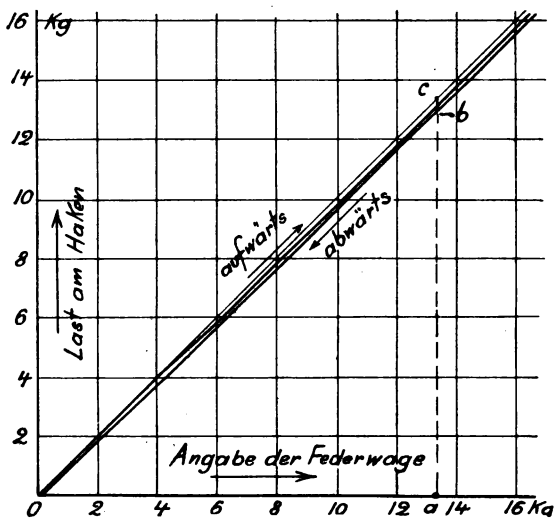


Fig. 7. Darstellung der Eichergebnisse.

Als Zahlenbeispiel geben wir die Eichung einer Federwage wieder:

Last am Haken:	0	2	4	6	8	10	12	14	16 kg
Angabe des Instruments: aufwärts:	0	2	4	6,1	8,1	10,2	12,2	14,2	16,2 „
Angabe des Instruments: abwärts:	0,1	2,1	4,2	6,2	8,3	10,3	12,3	14,4	16,4 „
Mittel:	0,05	2,05	4,1	6,15	8,2	10,25	12,25	14,3	16,3 „
Abweichg. v. wahren Wert:	0,05	0,05	0,1	0,15	0,2	0,25	0,25	0,3	0,3 „
Korrektion:	-0,05	-0,05	-0,1	-0,15	-0,2	-0,25	-0,25	-0,3	-0,3 „

Die Darstellung dieses Ergebnisses in Fig. 8 sieht sonderbar sprunghaft aus. Das kommt davon, daß die Korrektionen vergrößert sind. Große Unregelmäßigkeiten im Gang der Instrumente deuten sonst an, daß etwas nicht in Ordnung ist.

27. **Was eichen?** Man soll alle Instrumente eichen, welche einer Eichung fähig sind, und zwar vor und nach Anstellung der Versuche. Stimmen beide Eichungen genügend überein, so hat das Instrument sicher beim Transport oder bei den Versuchen keinen Schaden erlitten, der seine Gangart geändert haben könnte. Die Eichung vor den Versuchen sichert außerdem davor, daß eine Versuchsreihe ganz vergebens gemacht ist, wenn ein wichtiges Instrument während der Versuche zerbricht, so daß man es nicht mehr eichen kann.

28. **Parallaktischer Fehler; Anklopfen beim Ablesen.** Bei vielen Instrumenten mit Skala, so bei dicken Maßstäben, bei Manometern, Federwagen, wird die Ablesung falsch, wenn man beim Beobachten nicht senkrecht auf die betreffende Stelle der Skala schaut. Diesen allbekannten „parallaktischen Fehler“ zu vermeiden ist der Zweck eines Spiegels, den man, parallel zur Skala, namentlich bei elektrischen Instrumenten findet. Verdeckt der Zeiger sein Spiegelbild, so sieht man senkrecht auf die Skala. Gelegentlich ist auch die Skala selbst auf der Glasseite eines Spiegels angebracht: man sieht senkrecht auf die Skala, wenn die Striche der Skala sich mit ihrem Spiegelbild decken.

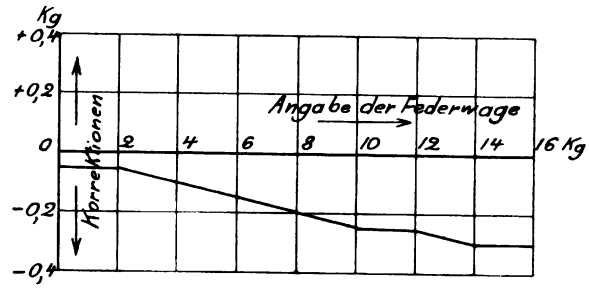


Fig. 8. Bessere Darstellung der Eichergebnisse.

Außerdem hat man beim Ablesen von Skaleninstrumenten, soweit solche der Reibung in ihrem Getriebe unterworfen sind (Manometer, Barometer, Hygrometer), das Instrument durch Anklopfen zu erschüttern, um die Reibung zu beseitigen oder doch zu mindern.

IV. Längenmessung.

29. **Einheiten; Druck und Temperatur.** Die Länge wird im technischen Maßsystem in Metern gemessen; das Meter ist eine der drei Grundeinheiten dieses Systems. Nach Bedarf verwendet man in der Technik auch Millimeter, Centimeter und Kilometer als Einheiten, in einigen Sonderfällen wird nach englischen Zollen gerechnet, 1″ engl. = 25,40 mm. Das alles bedarf keiner weiteren Erläuterung.

Das Volumen jedes Körpers ist abhängig von Druck und Temperatur; von diesen beiden Größen hängt also auch die Länge eines festen Körpers ab. Bei Längenmessungen wird man Druck und Temperatur berücksich-

tigen müssen, wenn es sich um feinere Messungen handelt. Folgende Angaben gewähren einen Anhalt für die Größe ihres Einflusses: Ein Temperaturunterschied von 100° C ändert die Länge von Eisen um 0,11%; er ändert also die wirksame Kolbenfläche einer Dampfmaschine um etwa das Doppelte, 0,22%. Der gleiche Temperaturunterschied ändert die Länge von Messing und Bronze um 0,18 bis 0,19%. Das sind Werte, die man meist nicht vernachlässigen darf. Dagegen ändert sich die Länge bei einer Belastung von 100 kg pro qcm erst um $\frac{1}{200}$% bei Schmiedeisen, um $\frac{1}{100}$% bei Gußeisen. Das ist wenig.

Der Einfluß der Temperatur ist also der bedeutendere. Die Temperatur beeinflußt den zu messenden Gegenstand, aber auch den messenden, der etwa ein einfacher Maßstab sei. Bestehen beide Teile — gemessener und messender — aus demselben Material und haben beide die gleiche Temperatur, so wird jede Messung das gleiche Ergebnis haben, bei welcher Temperatur sie auch ausgeführt sei. Wollte man die Abmessungen des warmen Dampfzylinders mit einem warmen Maßstab messen, so wäre dies falsch, die Ablesung wäre der Durchmesser des kalten Zylinders, vorausgesetzt, daß der Maßstab bei 15° C richtig geteilt war wie üblich. Will man den Durchmesser des warmen Zylinders messen, so muß man dafür sorgen, daß der Maßstab seine Normaltemperatur hat.

Mit anderen Worten: Das Meter ist definiert als Länge des in Paris aufbewahrten Platiniridiumstabes bei 0° C. Diese Einheit ist unabhängig von der Temperatur, und ein Meter ist bei 100° C ebenso lang wie bei 0°. Aber die Maßstäbe, mit deren Hilfe wir Messungen ausführen, ändern ihre Länge mit der Temperatur, sie können daher nur bei einer Temperatur richtig sein. Und die gemessenen Gegenstände ändern ihre Dimensionen ebenfalls mit der Temperatur, wir können also ihre Dimensionen nur für eine Temperatur richtig angeben. Für technische Zwecke ist 15° C die übliche Normaltemperatur; ein technischer Meterstab ist also bei 15° C so lang, wie der Pariser bei 0°. Vergliche man beide Stäbe direkt miteinander bei gleicher Temperatur, so wären sie verschieden lang.

Bei den zu messenden Gegenständen hat man darauf zu achten, ob man ihre Abmessungen bei 15° C, oder bei einer anderen Temperatur haben will. Will man ihre Abmessungen bei 15° C haben, so müßte man die Messung bei 15° ausführen. Führt man sie bei einer anderen Temperatur t aus, so müssen Maßstab und Gegenstand diese Temperatur t haben, und man hat eine Korrektion für den Temperaturunterschied $t - 15°$ auszuführen, welche der Verschiedenheit der beiden Ausdehnungskoeffizienten Rechnung trägt. Bestehen Maßstab und Gegenstand aus Materialien mit gleichem Ausdehnungskoeffizienten, so ist keine Korrektion nötig, sobald beide bei der Messung gleiche Temperatur haben. — Will man dagegen die Abmessungen des zu messenden Gegenstandes bei einer anderen Temperatur t_1 haben, etwa die des Dampfzylinders in warmem Zustande, so muß der

Gegenstand die betreffende Temperatur t_1 haben und der Maßstab seine Normaltemperatur 15°. Unter allen anderen Umständen wären Korrektionen einzuführen, die man durch die Messung im warmen Zustande ja gerade umgehen will. — Daß es für technische Zwecke fast immer ausreichend ist statt 15° einfach Zimmertemperatur zu sagen, ist klar.

Wenn wir sahen, daß wir den Einfluß verschiedener Pressung meist vernachlässigen können, so haben wir diese Bemerkung dahin richtig zu stellen, daß jedoch die Pressung eine Rolle spielen kann, mit welcher der messende und der gemessene Körper einander berühren, Von der ersten leisen Berührung beider bis zum vollen Anliegen der Berührungsflächen ist ein gewisser Spielraum gelassen, der bei großer zu messender Länge keine Rolle spielt, bei kurzen Längen aber von Bedeutung sein kann.

30. **Übersicht der Meßmethoden.** An Instrumenten zum Messen von Längen sind zu nennen: für rohe Messungen der einfache Maßstab, nötigenfalls unter Zuhilfenahme von Taster und Stichmaßen, und die Schublehre, für feinere die Schraublehre oder Mikrometerschraube, und für die feinsten technischen Messungen die Meßmaschine. Von dieser letzteren unterscheiden sich die in der Physik üblichen Instrumente, Comparator und Kathetometer, durch umständlichere Handhabung, die sie für die Benutzung durch weniger geübte Personen ungeeignet macht.

31. **Maßstäbe; Nonius.** Der einfache Maßstab und die Schublehre bedürfen keiner Beschreibung. Doch sei darauf aufmerksam gemacht, daß gerade bei den einfachsten Messungen, nämlich außer beim Ausmessen von Längen auch noch beim Wägen, viel gesündigt wird, indem man die käuflichen fabrikmäßig hergestellten Maßstäbe und Gewichte benutzt, ohne sich von ihrer Richtigkeit irgendwie zu überzeugen. Die üblichen Klappmaße sind in den Gelenken oft recht ungenau. Die richtige Ausmessung der Maschinendimensionen ist ebenso wichtig, wie die Feststellung des richtigen Federmaßstabes der Indikatoren oder wie die Eichung der Thermometer.

Man verwende also zuverlässige Maßstäbe, am besten stählerne nicht zusammenklappbare. Diese brauchen nur in volle Millimeter geteilt zu sein, man kann dann Zehntel schätzen. Engere Teilung, etwa in halbe Millimeter, erschwert die Ablesung, ohne sie genauer zu machen. Wo man nicht auf Schätzung sich verlassen will, da verwende man nicht einen enger geteilten Maßstab, sondern bediene sich des Nonius. An Schublehren und vielen anderen Instrumenten pflegt ein solcher vorhanden zu sein.

Der Nonius ist eine kurze Skala, die über der Hauptskala, dem Limbus, dahingleitet (Fig. 9). Der Nullstrich des Nonius ist derjenige, dessen Stellung auf dem Limbus man ermitteln will: wir lesen direkt ab 112 mm, und könnten noch Zehntel schätzen. Statt dessen lesen wir die Zehntel Millimeter am Nonius ab: dieser hat eine Länge von 9 mm, die aber in 10 Teile geteilt sind, so daß jeder Teil $^9/_{10}$ mm lang ist. Wir sehen zu,

welcher Teilstrich des Nonius mit einem Teilstrich des Limbus zusammenfällt, und finden, daß der Teilstrich 4 des Nonius mit einem (gleichgültig welchem) Striche des Limbus sich deckt. Also ist $^4/_{10}$ der Bruchteil des Millimeters, den wir noch zu den abgelesenen 112 mm hinzuzuzählen haben: der Nullpunkt des Nonius steht bei 112,4 der Hauptskala, und das ist dann bei einer Schublehre auch der Abstand der Maulhälften. — Der Beweis ist eine einfache Rechenaufgabe.

Dieser Nonius war darauf eingerichtet, daß man Zehntel der Hauptteilung ablesen konnte. Will man Zwanzigstel ablesen, so ist der Nonius 19 mm lang (Fig. 10), dieser Abstand ist in 20 Teile geteilt, jeder Teil

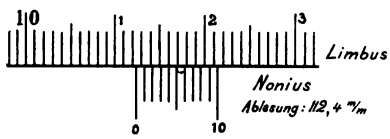


Fig. 9.

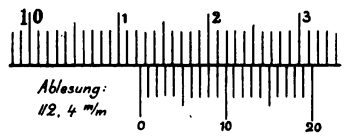


Fig. 10.

ist $^{19}/_{20}$ mm lang. Diesmal finden wir, daß der Strich 8 des Nonius sich mit einem (beliebigen) Strich des Limbus deckt, also sind $^8/_{20}$ mm zu der ursprünglichen Ablesung hinzuzufügen, die auch hier wieder 112 war. Daher lesen wir $112\frac{8}{20}$, also wieder 112,4 an der Schublehre ab.

Wir lasen mit dem ersten Nonius auf Zehntel, mit dem zweiten auf Zwanzigstel Millimeter genau ab. Wollten wir den Nonius noch weiter verlängern, um etwa auf Hundertstel Millimeter abzulesen, so wäre das zwecklos: die Teilung einer gewöhnlichen Schublehre ist nicht auf Hundertstel Millimeter genau ausgeführt, also darf man auch die Ablesung nicht so weit treiben. Die Teilstriche sind überdies so dick, daß man schon bei dem Nonius für $^1/_{20}$ mm im Zweifel ist, wo Deckung zweier Striche am besten stattfindet.

Für jeden Nonius aber, auch wenn er bei Zollmessungen für Zwölftel oder bei Winkelmessungen für Dreißigstel oder Sechzigstel eingeteilt ist, gilt folgendes: Will man n-tel der Hauptteilung ablesen, so ist der Nonius $n - 1$ Teile der Hauptteilung lang und diese Länge ist in n Teile geteilt. Deckt sich nun der m-te Teilstrich des Nonius mit einem Strich des Limbus, so steht der Nullstrich des Nonius um $\frac{n}{m}$ Teile vom vorhergehenden Strich der Hauptskala ab.

32. **End- und Strichmaße.** Man unterscheidet End- und Strichmaße. Ein Endmaß hat die Länge, nach der es heißt, zwischen seinen beiden Stirnenden, ein Strichmaß gibt die betreffende Länge als Abstand zweier Striche, die auf seiner Breitseite aufgerissen sind. Die Klappmaßstäbe geben die Länge 1 m als Endmaß, für jeden anderen Abstand sind sie einerseits End- andererseits

Strichmaß. Endmessungen sind sehr bequem, aber Strichmessungen oft genauer, zumal da Endmaße sich abnutzen können. Deshalb verwendet man bei den Klappstäben meist den Strich 1 cm als Anfang der Messung. Der Grund ist offenbar der, daß dann der Maßstab nach beiden Seiten hin symmetrisch verläuft, nach beiden Seiten hin setzt sich die Teilung fort, daher kann man den Maßstab sicherer anlegen. Deshalb sollten auch die Teilungen reiner Strichmaße, wie der Zeichenmaßstäbe oder Rechenschieber, über den Nullpunkt hinaus um einige Teile fortgesetzt sein, nach Fig. 11, damit sich dem Auge wieder ein symmetrisches Bild bietet. In der Tat benutzt jedermann beim Zeichnen den 1 cm-Strich als Anfang, weil er so schneller und genauer arbeitet.

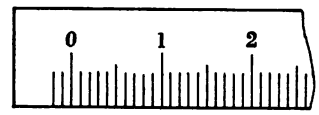


Fig. 11.

33. **Schraublehre.** Für feinere Messungen dient die Schraublehre oder Mikrometerschraube (Fig. 12). Das zu messende Stück wird zwischen die Endflächen zweier Schrauben, *a* und *b*, genommen, die durch einen Bügel gehalten werden. Die Schraube *a* ist eine Nachstellvorrichtung. Die Schraube *b* hat genau 1 mm Ganghöhe und ist der eigentlich messende Teil: jeder Bruchteil einer Umdrehung dieser Schraube ändert den Abstand der Meßflächen um den gleichen Bruchteil eines Millimeters. Man kann also Bruchteile von Millimetern bei *c* am Umfang des Griffes ablesen, mit dessen Hilfe man die Schraube dreht, die vollen Millimeter gibt eine Skala *d* am festen Bügel.

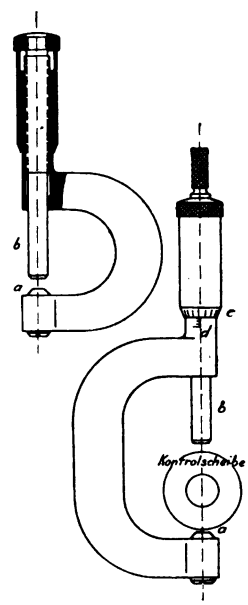


Fig. 12a und 12b.
Mikrometerlehren.

Vor Benutzung hat man sich davon zu überzeugen, daß die Ablesung richtig 0,0 (bei Fig. 12a) wird, wenn man die Schrauben *a* und *b* direkt gegeneinander schraubt, sonst ist Schraube *a* nachzustellen. Bei der Messung selbst muß dann die Meßschraube ebenso stark angezogen werden, wie bei dieser Justierung. Das wird bei manchen Schraublehren durch besondere Vorrichtungen (Friktionsanstellung) erreicht, die bei jeder Messung einund denselben Druck erreichen läßt.

Da lange Schrauben nicht gleichmäßig herzustellen sind, so hat man nicht eine Schraublehre für alle Abmessungen, sondern mehrere für jedesmal kleinere Meßbereiche, etwa von 0 bis 25, von 25 bis 50, von 50 bis 75 mm je eine. Die letzteren lassen sich zum Justieren nicht ganz zusammenschrauben, sondern man hat dazu eine Kontrollscheibe (Fig. 12b) von genau 25 oder genau

50 mm Durchmesser nötig, die man ausmißt und danach die Einstellung der Nachstellschraube berichtigt.

34. **Meßmaschine.** Meßmaschinen dienen für genaueste Messungen. In Deutschland werden sie nur von J. E. Reinecker in Chemnitz hergestellt. Dessen Maschinen sind gewissermaßen große Schraublehren. So wie man bei den Schraublehren für größere Längen als etwa 25 mm erst die Justierung durch Ausmessen einer Kontrollscheibe vornimmt, und durch Ablesen der Schraubendrehungen den zu messenden Körper mit der Kontrollscheibe vergleicht, so vergleicht man bei der Reineckerschen Meßmaschine den zu messenden Stab mit einem Normalstab. Da man aber die Genauigkeit der Messung auf $\frac{1}{10000}$ mm treiben will, so kommt man in den Bereich, wo die sorgfältigst hergestellte Meßschraube über größere Längen hin unzuverlässig ist, und wo die Pressung der Fühlflächen gegeneinander nicht dem Gefühl des Messenden überlassen bleiben darf. Man entnimmt Normalstab und zu messenden Körper aus dem gleichen Wasserbade, beide haben dann bei schnell ausgeführter Messung gleiche Temperatur. Die Temperatur der Meßmaschine ist ohne Einfluß.

Die Meßmaschine von Reinecker ist in Fig. 13 dargestellt und wird wie folgt gehandhabt: Man bringt den Normalstab zwischen die Fühlflächen f und f'. Dazu bringt man erst durch Drehen der Transportschraube (Handrad H) den ganzen linken Teil in eine ungefähr passende Stellung auf Bett B, und nähert ihm nun durch Drehen des großen Meßrades M und durch Vermittlung der Mikrometer-Meßschraube m die Fühlfläche f, bis sie anliegt und bis durch den entstehenden Druck die Flüssigkeit im Glasrohre G steigt. Dieser Druck wird nämlich von der Fühlfläche f aufgenommen und durch die biegsame Blechwand auf die Flüssigkeit in E übertragen, die nun ins beiderseits offene Glasrohr G tritt. Man liest die Stellung des Meßrades M am Nonius N ab und fixiert die Größe der ausgeübten Pressung durch Einstellen der Marke y in Höhe des Flüssigkeitsstandes. Man ersetzt nun den Normalstab durch den zu messenden, der möglichst wenig kleiner oder größer sein soll und stellt das Meßrad M so ein, daß die Flüssigkeit wieder bis zur Marke y steht, also der Druck der gleiche ist wie vorher. Diese Einstellung kann man erst roh annähern, dann durch die Schnecke S nach Anziehen der Mutter p vollenden. Man liest wieder am Meßrad M ab, und hat, da eine Umdrehung einem Millimeter entspricht, den Unterschied in der Länge beider Stäbe; die des Normalstabes kennt man aber. — Das Meßrad ist am Umfang in $\frac{1}{1000}$ geteilt, $\frac{1}{10000}$ läßt der Nonius bei N ablesen. Diese feine Ablesung hat nur Zweck, wenn man die Schraube über so kurze Längen benutzt, daß man ihren Fehler vernachlässigen kann. Man soll daher Normalstäbe in Abstufungen von 5 mm haben, wenn allerfeinste Messung verlangt wird, mindestens aber für je 25 mm.

Man findet auch bei uns gelegentlich Meßmaschinen amerikanischen

Ursprungs, von Pratt & Whitney in Hartford Conn. Diese sind etwas anders eingerichtet: eine Teilung in Zoll oder Centimenter ist auf dem Bett der Maschine sehr fein eingraviert. Man stellt ein Mikroskop mit Fadenkreuz auf diese Teilung ein, statt der Einstellung nach Normalstäben bei Reinecker, und liest die Bruchteile von Zollen oder Centimetern an einer Mikrometerschraube mit Meßrad ab. Die Teilung auf dem Bett ersetzt also die Normalstäbe. Statt den Druck durch eine Flüssigkeitssäule zu

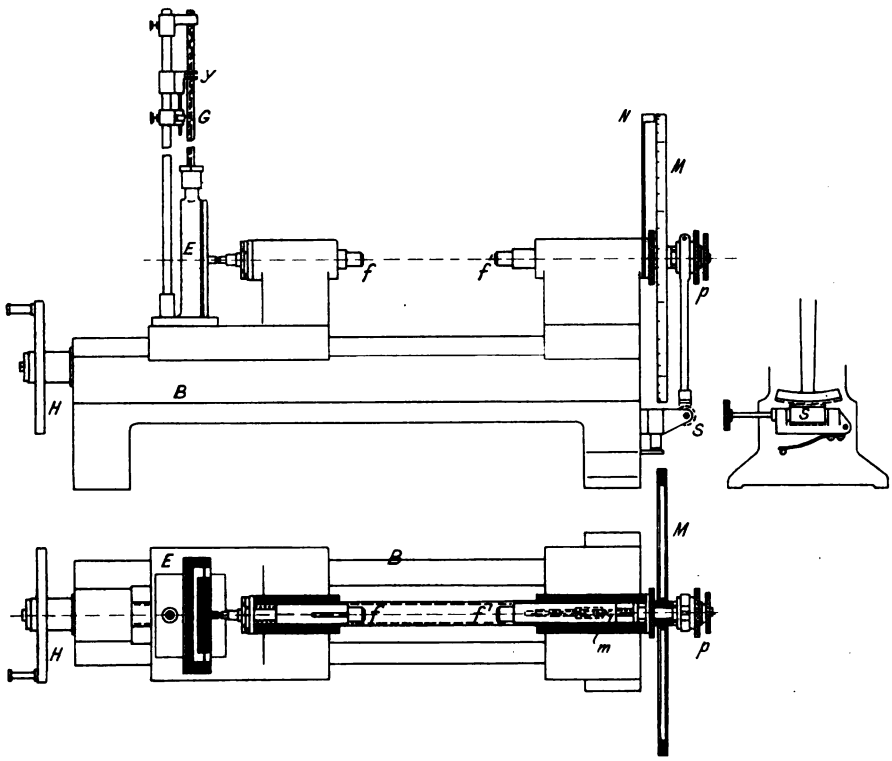


Fig. 13. Meßmaschine von Reinecker.

messen, beobachtet man einen kleinen eingeklemmten Körper, der herabfällt, wenn der Druck auf den zu messenden Stab eine gewisse Größe erreicht. Daß diese Maschine direkt mißt — die von Reinecker vergleicht nur mit einem Normalstab — ist ein rein theoretischer Vorteil. Eine Meßmaschine wird stets so sorgfältig behandelt, daß sich die Normalstäbe nicht schnell abnutzen; einer Änderung beim Transport sind Normalstäbe weniger ausgesetzt als das Bett der amerikanischen Maschine. Die Messung wird bei jener Maschine falsch, wenn nicht Maschine und zu messender Gegenstand gleiche Temperatur haben, und das ist schwer erreichbar.

35. **Stichmaße; Grenzlehren.** In der Werkstatt führt man Messungen gerne mit Hilfe von Instrumenten aus, welche die herzustellende Länge direkt darstellen, mit Stichmaßen etwa. Die Maßstäbe, Schraublehren usw. enthalten außer der zu messenden noch jede andere Länge, das Messen mit Stichmaßen geht daher schneller von statten, und setzt weniger Übung voraus. Die Stichmaße werden mit einem der bisher beschriebenen Instrumente geprüft.

Stichmaße im engeren Sinne sind allbekannt. Zur Kontrolle von Bohrungen und Zapfen bis zu 100 mm Weite hat man Kaliberbolzen und Kaliberringe, Fig. 14, die aus gehärtetem Stahl mit einem garantierten Genauigkeitsgrad von $\pm {}^1/_{500}$ mm käuflich sind. Für weitere Bohrungen werden die Bolzen zu schwer; man ersetzt sie wohl durch sphärische Endmaße, Fig. 15, deren Endflächen Teile einer Kugel von dem betreffenden Durchmesser bilden, so daß schräges Einführen keinen Fehler verursacht, wie das bei einfachen Stichmaßen der Fall ist.

Man kann die Genauigkeit der Stichmaße mit Hilfe der Meßmaschine sehr weit treiben, und auch die Herstellung von Maschinenteilen, ins-

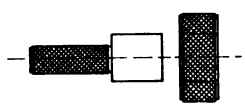


Fig. 14.
Kaliberlehre.

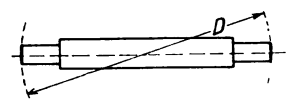


Fig. 15.
Lehre mit Kugelendflächen.

besondere zusammenpassenden, ist so genau möglich, daß ein Fehler nicht mehr nachweisbar ist, beinahe absolut genau. Aber solche absolute Genauigkeit zu erreichen, ist teuer, und überflüssig selbst dann, wenn man in modern eingerichteten Werkstätten Austauschbarkeit der entsprechenden Teile mehrerer Maschinen anstrebt, im sogenannten Austauschbau. Es genügt hierfür, daß der fertige Maschinenteil vom Sollmaß um nicht mehr als einen gewissen Betrag, sagen wir ${}^1/_{100}$ mm nach oben oder unten abweiche. Ein Zapfen von 70 mm Durchmesser darf dann zwischen 69,99 und 70,01 mm angefertigt werden. Das zugehörige Lager muß soviel weiter sein, daß Öl sich halten kann, sagen wir 0,2 mm weiter, es sollte also 70,2 mm Durchmesser haben, darf aber von 70,19 bis 70,21 mm angefertigt werden, denn es ist gleichgültig, ob der Spielraum für das Öl in den äußerst möglichen Fällen nur 0,18 oder aber auch 0,22 mm ist statt 0,2. Um in dieser Weise die Genauigkeit der Arbeit in bestimmten Grenzen zu halten, bedient man sich der Grenzlehren, wie solche in Fig. 16 zum Prüfen von Löchern und in Fig. 17 zum Prüfen von Bolzen dargestellt sind. Der Lehrbolzen fürs Lager trägt den Aufdruck 70,2; das eine, mit + bezeichnete Ende hat 70,21 mm Durchmesser, stellt die obere Grenze dar und darf nicht in das Loch hineingehen; das andere Ende,

mit — bezeichnet, hat 70,19 mm Durchmesser, muß hineingehen, und zwar ohne Gewalt. Die Rachenlehre für den Bolzen trägt den Aufdruck 70; die Schnäbel sind 69,99 und 70,01 mm weit, nur der letztere darf über den Bolzen gehen.

Der zulässige Fehler, hier $^1/_{100}$ mm, heißt Toleranz, die Grenzlehre daher auch wohl Toleranzlehre. Die Größe der Toleranz richtet sich nach

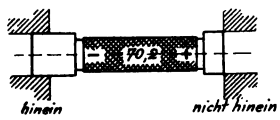


Fig. 16. Grenzlehre für Löcher.

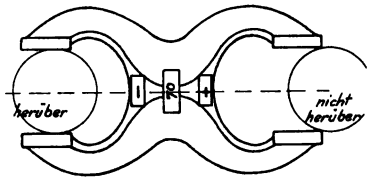


Fig. 17. Grenzlehre für Zapfen.

der Art der Arbeit. Auch die Größe des Spielraums, hier 0,2 mm, hängt von den Verhältnissen ab, für warmes Aufziehen wird er negativ. Das zu besprechen gehört in eine Konstruktionslehre, nicht zum Meßwesen.

V. Flächenmessung.

36. **Einheiten; Übersicht der Instrumente.** Der Inhalt einer Fläche — der ja bekanntlich in Quadratcentimeter, Quadratmeter, auch in Quadratfuß oder -zoll angegeben wird — kann aus den linearen Abmessungen durch einfaches Ausmultiplizieren oder mit Hilfe der Simpsonschen Regel oder anderer mathematischer Formeln gefunden werden. Auf diese einzugehen, ist hier nicht der Ort. Im folgenden sollen nur die Planimeter besprochen werden, das sind Meßinstrumente, welche die Größe der Fläche durch mechanisches Umfahren ihrer Umrisse zu ermitteln gestatten.

Das Amslersche Polarplanimeter ist das gebräuchlichste für die Zwecke des Maschinenbauers. Bei großer Einfachheit in Konstruktion und Handhabung läßt es eine Genauigkeit von $^1/_4$ Prozent erreichen, was den Bedürfnissen bei der Auswertung von Indikator- und handgezeichneten Diagrammen durchaus entspricht, da diese Figuren selbst kaum mit solcher Genauigkeit verzeichnet werden können. Das Linearplanimeter ist nur eine andere Form des Polarinstruments und manchmal bequemer; es wird in Amerika sehr viel verwendet. Im Schiffbau und in der Geodäsie stellt man höhere Anforderungen an die Genauigkeit und verwendet daher kostspieligere Instrumente, unter denen wir das Rollenplanimeter nennen wollen. Diese Instrumente sollen hier nicht besprochen werden.

Integraphen sind Instrumente, welche zu einer gegebenen Kurve $y = f(x)$ die Integralkurve $y' = \int f(x)\,dx$ graphisch verzeichnen; die von ihnen verzeichnete Endordinate stellt also nach Lehren der Mathematik

ebenfalls die Fläche unter der gegebenen Kurve dar. Nur kann man noch die Aufaddierung Schritt für Schritt verfolgen. Auch diese Instrumente sind für unsere Zwecke unwesentlich.

37. **Amsler-Planimeter.** Das Amslersche Polarplanimeter ist in Fig. 18 schematisch dargestellt. Zwei Stäbe MF und PG sind im Gelenk G miteinander verbunden. Der Pol P ist eine Spitze, die man fest ins Papier setzt und durch ein Gewicht beschwert, mit dem Fahrstift F umfährt man die auszumessende Figur von einem beliebigen Punkt des Umfangs bis zu genau demselben Punkt; dann läuft das Meßrädchen M auf dem Papier, auf dem es ebenfalls aufliegt, und zwar ist die abgewickelte Länge, wie die Theorie zeigen wird, proportional der Fläche, welche wir umfahren hatten. Wir können also den Umfang des Meßrädchens direkt in Quadratcentimeter Fläche einteilen. Das Meßrad und sein Nonius ist in Fig. 19 dargestellt. — Wenn wir beim Umfahren das Meßrädchen beobachten, so sehen wir es wiederholt in der einen und anderen Richtung umlaufen; die Endstellung gibt uns die umfahrene Fläche. Wollten wir aber ablesen, bevor wir

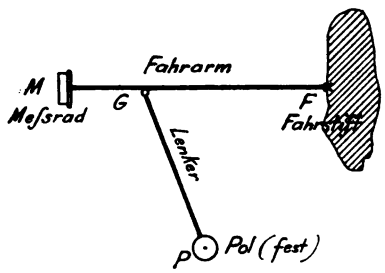


Fig. 18.

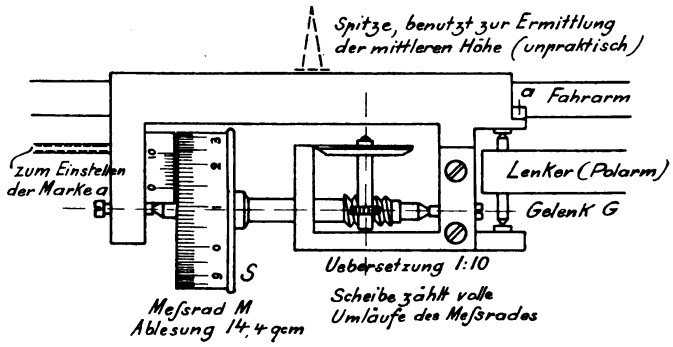


Fig. 19. Meßrad des Polarplanimeter.

wieder zum Ausgangspunkt der Umfahrung zurückgekehrt sind, so würden wir nicht eine zu kleine, sondern eine ganz willkürliche Ablesung erhalten, die ein sehr Vielfaches der richtigen sein kann.

38. **Theorie desselben.** Die einfachste Theorie des Planimeters ist die von Kirsch, die wir im folgenden wiedergeben.

Der wirksame Teil des Planimeters ist das Meßrädchen, dessen Drehung wir ablesen. Wenn wir ein solches Meßrädchen, Fig. 20, in Richtung des

Pfeils *1*, also in Richtung der Achse, bewegen, so wird es sich offenbar gar nicht drehen, es gleitet; wenn wir es — immer natürlich mit seiner scharfen Kante auf der Papierebene aufliegend — in Richtung des Pfeils *2*, senkrecht zur Achse bewegen, so wird einfach Rollen stattfinden und die zurückgelegte Strecke vollständig durch Ablesen des Rades festzustellen sein. Von jeder anderen Bewegung wird die Komponente in Richtung des Pfeils *2* vom Meßrad registriert. Wenn wir weiter an einem Lineal eine Reihe von Meßrädchen, die in einer Ebene liegen, also mit zueinander parallelen Achsen so anbringen, daß alle das Papier berühren (Fig. 21), so drehen sich alle diese Rädchen übereinstimmend um denselben Winkel, ganz gleichgültig, wie man das Lineal bewegt. Die Bewegung des Lineals aus der Lage AB (Fig. 22) in die Lage $A'B'$ kann man nämlich betrachten als zusammengesetzt aus einer Drehung um C als Mittelpunkt nach $A''B''$ — diese Drehung beeinflußt die Rädchen gar nicht — und aus einer Verschiebung des Lineals auf C zu —, diese Verschiebung beeinflußt alle Rädchen gleichmäßig. Jede irgendwie gestaltete Bewegung des Lineals kann man nun als Aufeinanderfolge von unendlich kleinen Drehungen und Verschiebungen auffassen.

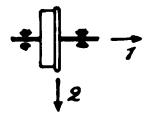


Fig. 20.

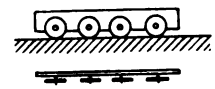


Fig. 21.

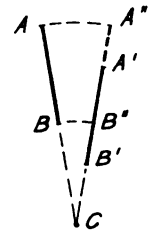


Fig. 22.

Wenn wir in Fig. 23 ein Planimeter haben, und dessen Fahrstift F im Kreise um den Pol P herumführen, so wird das Meßrädchen M sich ebensoviel abwickeln, wie ein bei M' gedachtes es tun würde, dessen Lagerung mit MF starr verbunden wäre.

Daraus folgt zunächst, daß das Meßrädchen sich überhaupt nicht abwickelt, wenn wir F auf einem Kreise von solcher Größe herumführen, wie Fig. 24 andeutet. Hier geht nämlich die Ebene des Meßrädchens M durch den Pol P. Den als Nullkreis bezeichneten Kreis vom Radius R_0 kann man also mit dem Fahrstift F umfahren, ohne daß das Meßrädchen sich abwickelt. Der Radius des Nullkreises ist offenbar, nach dem Pythagoras,

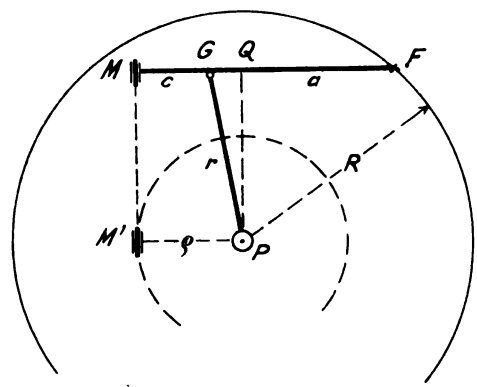


Fig. 23.

$$R_0 = \sqrt{(a+c)^2 + MP^2} = \sqrt{(a+c)^2 + r^2 - c^2} = \sqrt{a^2 + 2ac + r^2}\,.$$

Seine Fläche ist $F_0 = \pi(a^2 + 2ac + r^2)$. Sicherer als durch Rechnung können wir R_0 bestimmen, indem wir den Papierstreifen xy mit dem Pol P festspießen und die Lage von F ausprobieren: das Meßrädchen darf sich beim Bewegen des Streifens um P herum nicht abwickeln.

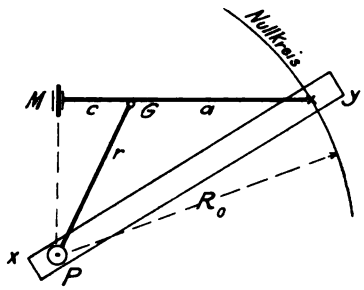


Fig. 24.

Wir kehren nun zur Fig. 23 zurück. M wickelt sich ebenso ab, wie M' es tun würde, bei einer vollen Umfahrung wickelt sich also eine Bogenlänge $s = 2\varrho\pi$ ab. ϱ läßt sich nun durch die anderen bekannten Größen ersetzen. Es ist $R^2 - (a + c - \varrho)^2 = r^2 - (\varrho - c)^2$, nämlich beides nach dem Pythagoras gleich $\overline{PQ}^2$, also ist $R^2 - a^2 + 2a(\varrho - c) = r^2$ und $\varrho = \frac{a^2 + 2ac + r^2}{2a} - \frac{R^2}{2a}$ oder auch $\varrho = \frac{R_0^2 - R^2}{2a}$, wo R_0 der Radius des Nullkreises ist. Der abgewickelte Bogen des Meßrädchens ist also $s = \frac{\pi}{a}(R_0^2 - R^2)$.

Umfahren wir einen zweiten Kreis vom Radius R' statt R mit dem Fahrstift, so wird, da ja R_0 das gleiche bleibt, diesmal ein Bogen $s' = \frac{\pi}{a}(R_0^2 - R'^2)$ abgewickelt werden.

Nun sehen wir leicht, was wir erhalten, wenn wir eine Fläche, wie die in Fig. 25 schraffierte, umfahren, die einen Kreisring mit dem Pol P des Instruments als Mittelpunkt bildet, der an einer Stelle ganz schmal aufgeschlitzt ist. Wir führen den Fahrstift überall in der Pfeilrichtung, daher passieren wir die radiale Strecke an der Aufschlitzung einmal nach innen gehend, einmal nach außen gehend, dabei wickelt sich das Meßrad einmal vorwärts, einmal rückwärts um gleichviel ab: die radialen Strecken heben sich also in ihrer Wirkung heraus. Die beiden den Ring begrenzenden Kreise werden auch in einander entgegengesetztem Sinne durchlaufen, das Meßrädchen läuft also einmal um die eben abgeleitete Größe s vorwärts, einmal um s' rückwärts und wird zum Schluß um $b = s - s'$ sich abgewickelt haben. Diese gesamte Abwicklung ist also $b = \frac{\pi}{a}(R^2 - R'^2)$. Schreiben wir dafür $R^2\pi - R'^2\pi = a \cdot b$, so haben wir links den Inhalt f der umfahrenen Ringfläche. Es ist also die umfahrene Fläche $f = a \cdot b$, gleich dem Produkte aus der (konstanten) Länge a des Fahrarms und dem am Meßrädchen abgewickelten Bogen b.

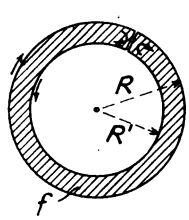


Fig. 25.

Nun sehen wir weiter, daß die Beziehung $f = a \cdot b$ auch für den in Fig. 26 schraffierten Teil eines konzentrischen Ringes gilt. Die radialen Strecken *2 3* und *4 1* werden in entgegengesetztem Sinne durchlaufen, heben sich also heraus. Beim Durchfahren der Kreisbögen *1 2* und *3 4* wickelt sich weniger am Meßrädchen ab als früher beim Umfahren der ganzen Kreise, aber gerade in dem Verhältnis weniger, in dem die jetzige Fläche zum ganzen Ring steht. Abgewickelte Bogen und umfahrene Fläche sind also einander proportional vermindert.

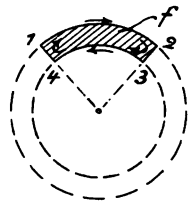


Fig. 26.

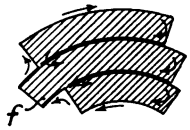


Fig. 27.

Eine unregelmäßige Fläche endlich können wir, wie Fig. 27 andeutet, aus einer Anzahl — nötigenfalls unendlich vielen — Ringstücken zusammengesetzt denken. Die inneren Kreisbögen würden je einmal hin und zurück durchlaufen werden, wir können sie also auslassen, und wenn wir nur die äußeren Konturen umfahren, so gilt auch hier: $f = a \cdot b$.

39. **Große Flächen.** Ist die zu umfahrende Fläche so ausgedehnt, daß man nicht alle Punkte des Umfangs erreichen kann, wenn der Pol P der Aufstellung außerhalb der Fläche liegt, so kann man die Fläche entweder in Teile zerlegen — oder aber man wählt einen Pol im Innern der Figur.

Diesen Fall führen wir mit Hilfe des Nullkreises auf den früheren zurück. In Fig. 28 soll der Inhalt der ganzen unregelmäßigen Figur bestimmt werden. Offenbar ist die schraffierte Figur um den Inhalt des Nullkreises kleiner als die gesuchte, für die schraffierte Figur aber gilt unsere Theorie ohne weiteres. Die gesuchte Figur hat also den Flächeninhalt: Planimeterablesung plus Inhalt des Nullkreises. Da nun beim Durchfahren des Nullkreises das Meßrädchen stillsteht, da sich ferner die zum Nullkreis führenden Strecken in ihrer Wirkung aufheben, so können wir uns deren Umfahrung ersparen, und haben einfach die Regel: Liegt der Pol im Innern der Figur, so ist die Ablesung am Meßrädchen um den Inhalt F_0 des Nullkreises zu vermehren. Dessen Radius R_0 bestimmt man durch Versuch, wie im vorigen Paragraphen angegeben (Fig. 24).

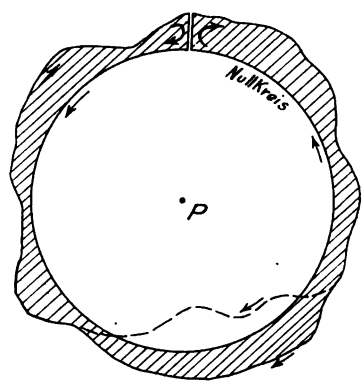


Fig. 28.

40. **Folgerungen aus der Theorie. Linearplanimeter.** Es war $f = a \cdot b$; Fläche = Fahrarm $\times$ abgewickelter Bogen. Die übrigen Abmessungen des Planimeters sind auf seine Wirksamkeit ohne Einfluß.

Man darf also die Länge des Fahrarms nicht durch Verbiegen des Fahrstiftes ändern, sonst ändert sich der Wert der Skala am Meßrad. Dagegen ist gleichgültig der Ort, wo das Meßrädchen angebracht ist: man

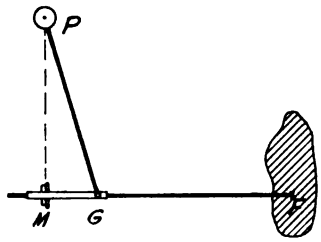


Fig. 29a.

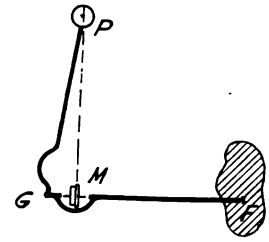


Fig. 29b.

findet die in Fig. 29 dargestellten Anordnungen. Diejenige, bei der man den Fahrarm nicht ändern kann, ist empfehlenswerter für einfache Zwecke. Stellt man die Schräubchen nach, in denen die Achse des Meßrädchens läuft, so ist das ohne Einfluß.

Ebenso gleichgültig ist die Länge des Lenkers PG. Man kann ihn also auch unendlich lang machen, d. h. den Punkt G geradlinig führen. Dadurch entsteht aus dem Polar- ein Linearplanimeter, wie solches in Fig. 30 dargestellt ist. Das Meßrädchen M bewegt sich genau so, wie ein bei M' befindliches. Das Linearplanimeter ist bequemer als das Polarinstrument, wenn man sehr langgestreckte Figuren, etwa die Schaubilder selbstschreibender Meßinstrumente, ausmitteln will. Mit dem Polarplanimeter kann man das nur stückweise.

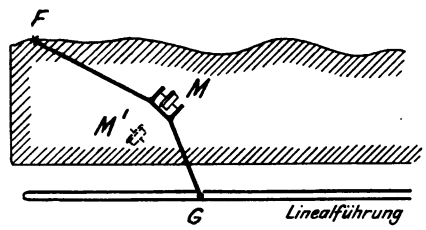


Fig. 30.

41. **Praktische Regeln; Genauigkeit.** Das Planimeter mißt längliche Figuren weniger genau aus als rundliche, weil bei ihnen das Verhältnis Umfang zu Fläche größer wird.

Beim Gebrauch erhält man die genauesten Resultate, wenn man dafür sorgt, daß das Meßrad möglichst rollt, möglichst wenig gleitet. Außerdem wird man dafür sorgen müssen, daß das Meßrad nicht unnütz weit in einer Richtung sich abwickelt und dann wieder zurückrollt, so daß man das Endresultat gewissermaßen als Differenz zweier Abwicklungen abliest, sondern das Meßrad soll möglichst immer in einem Sinne vorwärts rollend in seine Stellung gelangen. Letztere Bedingung zu erfüllen lege man den Mittelpunkt der Figur auf den Nullkreis, die erste erfüllt man, indem man noch die Längenrichtung der Figur radial zum Nullkreis legt. Siehe Fig. 29.

Bei Beachtung dieser Regeln ermittelt das einfache Polarplanimeter Flächen auf $^1/_5$ % genau, anderenfalls aber kommen Fehler von 1 % leicht vor.

Wesentlich ist, daß die Achse des Meßrades parallel zur Fahrarmachse steht. Steht sie schief, so macht das Planimeter für dieselbe Fläche verschiedene Angaben, je nach der Lage des Planimeterpols. Zur Prüfung des Planimeters umfahre man einen Kreis zweimal, und zwar einmal bei solcher Lage des Pols, daß $\sphericalangle PMF$ möglichst spitz, daß zweite Mal so, daß jener Winkel möglichst stumpf ist. Sind beide Angaben gleich, so ist das Instrument brauchbar; findet man bei spitzem PMF die größere Ablesung, so muß man den Fahrstift so nachrichten, daß seine Spitze zum Fahrarm hin gebogen wird.

42. **Simpsonsche Regel.** Einige Planimeter, welche einfacher sind als das besprochene, sind nicht zu empfehlen: so ist das Pryzsche Stangenplanimeter mehr interessant als brauchbar. Kompliziertere Instrumente, die mehr leisten als das Polarplanimeter, nannten wir in § 36. Wo man ein Polarplanimeter nicht zur Hand hat, berechnet man die Flächen nach der Simpsonschen Regel.

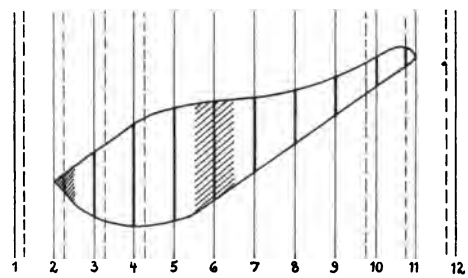


Fig. 31.

Eine Umgehung der Simpsonschen Regel ist das folgende Verfahren von Wagener: Man hält sich ein für alle Mal, etwa auf Pauspapier gezeichnet, ein Gitter wie Fig. 31, bestehend aus einer Anzahl Paralleler in gleichem Abstand; die punktierten Linien markieren ein Viertel des Abstandes der benachbarten Parallelen. Dieses Gitter legt man auf die zu messende Figur, so daß sie auf zwei der Parallelen endet. Man hat die starken Strecken zu addieren, dabei indessen die erste und letzte, die auf punktierten Linien liegen, nur halb zu nehmen — und hat die erhaltene Summe mit dem bekannten Abstand der Parallelen zu multiplizieren, dann ist das Ergebnis der Inhalt der Fläche. Die Begründung ist einfach: die starke Strecke auf der Parallelen *6* ist die mittlere Breite des schraffierten Trapezes, dessen Höhe gleich dem Parallelenabstand ist. Durch Aufaddieren der starken Strecken erhält man die Summe solcher Trapeze. An den beiden Enden des Diagramms bleiben Flächen von halber Breite, deshalb muß man die auf punktierten Linien liegenden Strecken nur halb nehmen. Das Aufaddieren der Strecken macht man mit einem Zirkel oder durch Aneinandertragen auf einem Streifen Papier.

VI. Zeitmessung.

43. Die Zeit wird nach Stunden, Minuten, Sekunden gemessen. Die Sekunde ist die zweite der Grundeinheiten des technischen Maßsystems. Zum Messen der Zeit dient die Uhr. In der einfachen Taschenuhr haben wir ein Meßinstrument von einer Genauigkeit, die kein anderes technisch verwendetes Meßinstrument erreicht. Denn wenn eine Uhr täglich eine Minute gewinnt oder verliert, so ist das schon mehr als man im gewöhnlichen Leben duldet, und doch ist erst ein Fehler von $\frac{1}{1440} \sim {}^1/_{10}\,\%$ vorhanden.

Ungenauigkeiten kommen weniger durch die Uhr selbst in die Messung, als dadurch, daß das Ablesen des Anfangs- und Endstandes der Uhr ungenau erfolgt. Dieser Fehler aber wird relativ um so kleiner, je größer der Zeitraum ist, während dessen man beobachtet — absolut bleibt ja seine Größe konstant.

Genauer als mit der gewöhnlichen Uhr kann man mit einer Arretieruhr, auch als Chronometer bezeichnet, messen, bei der ein besonderer großer Sekundenzeiger das ganze Zifferblatt bestreicht, dessen Umfang eine Minute darstellt und in Fünftelsekunden geteilt ist. Dieser Zeiger läuft nicht dauernd mit, sondern wird durch einen Druck auf den sonst zum Aufziehen bestimmten Knopf zum Mitlaufen, durch einen zweiten Druck zum Stehen gebracht: nun kann man die Zeit zwischen den beiden Drücken auf Fünftel- oder Zehntelsekunden genau ablesen. Nochmaliger Druck auf den Knopf bringt den großen Sekundenzeiger auf Null. Eine kleine Skala bei der XII läßt erkennen, wieviel volle Umläufe — Minuten — der große Sekundenzeiger durchlaufen hatte.

Andere genauere Zeitmeßmethoden mit Hilfe von Stimmgabeln, auch von elektrischen Kontakten, sind in der Physik gebräuchlich und werden bei genaueren technischen Untersuchungen bisweilen übernommen.

VII. Messung der Geschwindigkeit.

44. **Einheiten.** Unter Geschwindigkeit versteht man die von einem bewegten Körper in der Zeiteinheit zurückgelegte Strecke Weges. Wir können seine Geschwindigkeit berechnen, indem wir den in beliebiger beobachteter Zeit zurückgelegten Weg durch die beobachtete Zeit dividieren. Nehmen wir dabei den Weg in Metern und die Zeit in Sekunden an, so erhalten wir die Geschwindigkeit in $\left[\frac{\text{m}}{\text{sec}}\right]$.

Dieses ist die für die Geschwindigkeit der fortschreitenden Bewegung meist angewendete Einheit. Bei Eisenbahnen findet man die Geschwindig-

keit in $\frac{\text{km}}{\text{Stde}}$, bei Schiffen in Seemeilen pro Stunde angegeben. Es ist

$$1\ \frac{\text{km}}{\text{Stde}} = \frac{1000\ \text{m}}{3600\ \text{sec}} = 0{,}278\ \frac{\text{m}}{\text{sec}} \text{ und } 1\ \frac{\text{SM}}{\text{Stde}} = \frac{1853\ \text{m}}{3600\ \text{sec}} = 0{,}515\ \frac{\text{m}}{\text{sec}}.$$

45. **Einheiten bei drehender Bewegung.** Wo es sich um Drehung eines Körpers um eine Rotationsachse handelt — der im Maschinenbau häufigere Fall — da haben nur die in gleichem Abstand von der Rotationsachse liegenden Punkte gleiche Geschwindigkeit, verschieden weit von der Achse entfernte Punkte haben verschiedene Geschwindigkeiten, proportional ihrem Abstand von der Achse. Man kann also nicht schlechtweg von der Geschwindigkeit des Körpers sprechen. Da aber das Verhältnis Geschwindigkeit w eines Punktes zu seinem Abstand r von der Achse für alle Punkte das gleiche ist, so kann man dieses als Charakteristikum der Bewegung ansehen. Dies Verhältnis $\omega = \frac{w}{r}$ heißt die Winkelgeschwindigkeit des Körpers. Da w die Benennung $\left[\frac{\text{m}}{\text{sec}}\right]$, r die Benennung [m] hat, so ist die Benennung oder Dimension der Winkelgeschwindigkeit $\left[\frac{1}{\text{sec}}\right]$. Sie ist ja der durchlaufene Winkel pro Zeiteinheit, der Winkel aber ist, mathematisch, eine unbenannte Zahl: 180^0 mathematisch $= \pi = 3{,}1416$. Man kann die Winkelgeschwindigkeit auch als Geschwindigkeit der 1 m von der Achse entfernten Punkte definieren.

Die Einheit der Winkelgeschwindigkeit ist im technischen Maßsystem diejenige, bei der der Winkel Eins $= \frac{180^0}{\pi} = 57^0\,17\frac{3}{4}'$ in der Sekunde durchstrichen wird, oder was dasselbe ist, bei der die Punkte im Abstand 1 m von der Achse die Geschwindigkeit $1\ \frac{\text{m}}{\text{sec}}$ haben.

Diese Einheit ist für Messungen gar nicht gebräuchlich, in einigen Fällen aber muß man auf sie zurückgreifen, wenn man nämlich die Winkelgeschwindigkeit mit anderen Einheiten in Beziehung setzen will, z. B. bei Ermittlung des Gewichtes oder Trägheitsmomentes von Schwungrädern.

Die allgemein übliche Angabe der Winkelgeschwindigkeit ist die in minutlichen Umläufen (Touren pro Minute). Es ist offenbar $1\ \frac{\text{Umdr.}}{\text{Sec}} = 2\,\pi$ technischen Einheiten $= 60\ \frac{\text{Uml.}}{\text{Min.}}$, also ist

$$1 \text{ technische Einheit} = \frac{60}{2\,\pi} = 9{,}55\ \frac{\text{Uml.}}{\text{Min.}}$$

oder

$$100 \text{ Uml. p. Min.} = 10{,}47 \text{ technische Einheiten.}$$

46. **Übersicht der Meßmethoden; Beziehungen zwischen fortschreitender und Drehgeschwindigkeit.** Die Messung der fortschreitenden Geschwindigkeit ist bei Gasen und Flüssigkeiten ausführbar mit Hilfe besonderer Instrumente, von denen der Woltmannsche hydrometrische Flügel und das Anemometer sowie die Pitotsche Röhre im folgenden besprochen werden sollen. Das Schiffslog dient zum Messen der Geschwindigkeit eines Schiffs, indem es, eingerichtet wie der Woltmannsche Flügel, die relative Geschwindigkeit des Wassers gegen den Schiffskörper mißt. Man hat aber kein Instrument, welches direkt die fortschreitende Geschwindigkeit fester Körper angibt. Will man bei festen Körpern nicht Zeit und Weg einzeln messen, so muß man die Messung auf die bequem zu ermittelnde Rotationsgeschwindigkeit zurückführen. Die Umlaufgeschwindigkeit von festen Körpern, Achsen und dergleichen kann man nämlich mit Hilfe von Umlaufzählern oder von Tachometern ermitteln, die beide im folgenden zu besprechen sind.

Die erwähnte Zurückführung der Messung fortschreitender Geschwindigkeit auf Winkelgeschwindigkeit ist so auszuführen, wie zwei Beispiele zeigen werden: Bei Lokomotiven mißt man die Fahrgeschwindigkeit, indem man die Drehgeschwindigkeit eines seiner Räder ermittelt. Sei diese n Touren pro Minute, und sei D m der Raddurchmesser, so ist πD der Radumfang, der $\frac{n}{60}$ mal in der Sekunde abgewickelt wird: also ist $\frac{\pi Dn}{60}$ die Umfangsgeschwindigkeit des Rades, und zugleich die Fahrgeschwindigkeit des Zuges in $\frac{\text{m}}{\text{sec}}$, weil das Rad auf den Schienen nicht gleiten soll. Man kann natürlich das Tachometer, welches die Tourenzahl des Rades feststellt, gleich für Kilometer pro Stunde eichen. Seine Angabe wird aber ungenau, wenn das Rad sich abnutzt oder nachgedreht wird. — Wir messen eine Riemengeschwindigkeit, indem wir an den Riemen ein Rädchen von bekanntem Durchmesser D halten, dessen Tourenzahl wir dann feststellen. Wir haben uns davon zu überzeugen, ob das Rädchen nicht auf dem Riemen gleitet. Aus der Umlaufzahl der Riemenscheibe kann man die Riemengeschwindigkeit nicht genau finden, weil der Riemen auf der Scheibe gleitet, sobald Arbeit übertragen wird. Übrigens ist ja auch, wegen der Dehnung, die Geschwindigkeit beider Trums nicht unerheblich voneinander verschieden.

47. **Umlaufzähler.** Die Umdrehungszahl von Wellen ermittelt man mit dem Tourenzähler, oder mit dem Tachometer.

Der Tourenzähler oder das Zählwerk besteht in seinem wirksamen Teil aus einer Anzahl von zehnzähnigen Zahnrädern. Eines derselben, das Einerrad, wird direkt von der Maschine angetrieben, so zwar, daß es bei jedem Umlauf der Maschine um einen Zahn vorrückt. Da nun an seinem Umfang, den Zähnen entsprechend, die zehn Ziffern von 0 bis 9 angebracht sind, so tritt eine, und bei jeder Umdrehung der Maschine die folgende, Ziffer vor ein Schau-

glas, wo man sie abliest. Jedesmal nun, wenn das Einerrad von 9 wieder auf 0 geht, schiebt es durch einen Mitnehmer das folgende, sogenannte Zehnerrad um einen Zahn weiter und bringt dort, nach je zehn Umdrehungen, die folgende Ziffer vor das Schauglas. Daher liest man nach der Ablesung ⓪⑨ nicht wieder ⓪⓪ ab, sondern ①⓪, 10 folgt auf 9 wie es sein muß. Ganz analog wird nach 10 Umdrehungen des Zehnerrades das Hunderterrad um Eins vorwärtsgeschaltet, so daß auf 099 folgt 100, und so fort meist bis 100000. Über diese Wirksamkeit des Zählwerkes belehrt man sich durch Beobachtung eines derselben, das man an jeder größeren Maschine finden kann, schneller als durch eine umständliche Beschreibung.

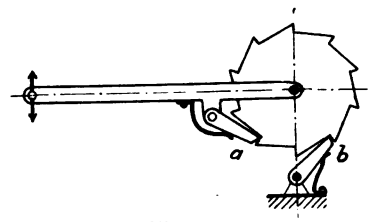


Fig. 32a.

Die Vorwärtsschaltung des Einerrades kann durch eine der beiden Vorrichtungen Fig. 32 bewirkt werden. Das Gesperre (Fig. 32a) ist das einfachste, Sperrkegel *a* schaltet vorwärts, *b* soll Rückwärtsgehen des Rades hindern. Der Anker (Fig. 32b) ist von der Pendeluhr her bekannt. Bewegt man von der gezeichneten Stellung aus den Anker *A* abwärts (er dreht sich um *M*), so wird Zahn *1* durch Nase *a* vorwärts geschoben; geht der Anker nun wieder hinauf, so tritt Nase *b* hinter den Zahn *6* und schiebt das Einerrad wieder vorwärts. Die hin und her gehende

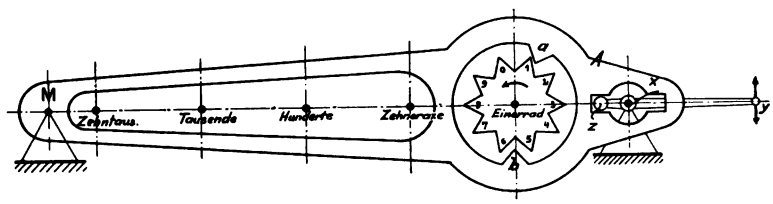


Fig. 32b.

Bewegung des Ankers kann nun bewirkt werden, entweder indem man die kleine Welle *x* mittels Hebel *y* von einem hin und her gehenden Teil der Maschine aus antreibt, oder indem man die Welle *x* von einem rotierenden Teil umdrehen läßt. In beiden Fällen bewirkt die Kurbel *xx*, um *x* sich drehend, eine hin und her gehende Bewegung des Ankers.

Ankerzähler schalten nach jeder halben Umdrehung um eine halbe Zahl vorwärts, Sperrkegelzähler nach jeder vollen Umdrehung direkt auf die nächste Zahl; die letzteren lassen sich daher bequemer ablesen, machen aber Geräusch.

Hat das Einerrad sich einmal ganz gedreht, so muß es das Zehnerrad um eine Zahl vorwärts schalten, dieses nach jeder Umdrehung das Hunderter-

rad, und so fort. Diese Schaltung wird durch ein Getriebe bewirkt, das in Fig. 33 dargestellt ist: wenn das Einerrad von 9 auf 0 geht, wird das Zehnerrad durch den Stift s vorwärts geschaltet. Das ist möglich, weil die Kerbe k zur gleichen Zeit das Zehnerrad frei gibt, während das Zehnerrad sonst immer durch die Scheibe t an Drehung verhindert wird. Es mag noch nützlich sein zu bemerken, daß das Zehnerrad zwanzig Zähne hat, von denen jeder zweite breiter ist als die übrigen. Stift s schaltet immer um zwei Zähne vorwärts, d. h. um $^1/_{10}$ Umdrehung. Stift s_1 und Kerbe k_1 dienen dazu, in gleicher Weise das Hunderterrad anzutreiben.

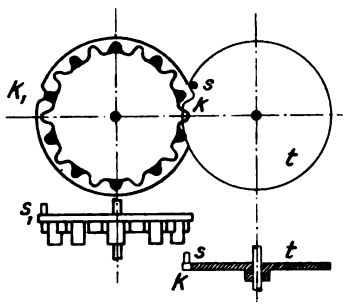


Fig. 33. Übertragung von Einer- auf das Zehnerrad, und weiter.

Handzählwerke bestehen meist aus einer Kombination von Arretieruhr und eigentlichem Zählwerk. Beide beginnen erst zu laufen, wenn man den Dreikant so kräftig in den Körner der Welle preßt, daß die kleine Hülse h (Fig. 34) einer Federkraft entgegen, eingedrückt wird. Beim Zurücknehmen des Dreikants von der Welle hören Zählwerk und Chronometer gleichzeitig zu laufen auf und man liest beide ab, um die Anzahl der Umdrehungon durch die Zeit, auf $^1/_5$ sec genau ablesbar, teilen zu können. Die Ablesung des Zählwerkes erfolgt auf der Seite, die in der Figur nicht sichtbar ist. Schnepper i stellt das Chronometer auf Null.

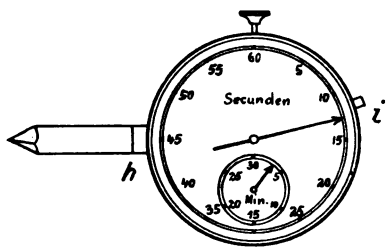


Fig. 34. Zählwerk.

Einen ganz andersartigen Umlaufzähler, hauptsächlich als Handinstrument brauchbar, gibt Fig. 35. Man drückt den Dreikant in den Körner der zu untersuchenden Welle, die Schnecke a läuft dann um. Von den beiden Rädern hat eines 100, eines 101 Zähne, letzteres bleibt daher bei 100 Umläufen der Schnecke um einen Zahn hinter dem anderen zurück. Man liest am Zeiger x die Umläufe, am Zeiger y je 100 Umläufe der Schnecke ab.

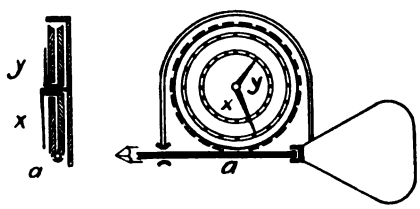


Fig. 35. Tourenzähler.

Bei Handzählern ist es stets empfehlenswert, doch nicht immer bequem ausführbar, eine zuverlässigere Kuppelung des Instruments mit der

zu prüfenden Welle zu machen als der einfache Dreikant sie bietet; dieser schlüpft, namentlich wenn man das Instrument schief hält. Statt des Dreikants verwendet man Gummipolster. Vgl. § 52.

48. **Praktisches.** Um die Tourenzahl einer Maschine festzustellen, liest man den Stand des Zählers am Anfang und wieder am Ende einer Zeitperiode ab, die so lang wie möglich sei; denn man kann nur volle Touren ablesen, und das Fehlen der Bruchteile sowie eine Ungenauigkeit im Zeitpunkte der Ablesungen verliert an Einfluß bei längerer Zeitdauer. Um die mittlere minutliche Umlaufzahl für eine Stunde zu finden, zähle man also nicht alle zehn Minuten je eine Minute lang, sondern man notiere alle zehn Minuten den Stand des Zählers: die Differenz von End- und Anfangsangabe, geteilt durch 60, gibt die mittlere Umlaufzahl: die Zwischenablesungen nach 10, 20... Minuten kontrollieren die Gleichmäßigkeit des Maschinenganges. Bei kurzen Ablesungszeiten erreicht man etwas größere Genauigkeit unter Verwendung einer Arretieruhr, mit deren Hilfe man die Zeit für 10 oder 20 Umläufe durch Drücken feststellt. Man arbeitet so genauer, weil man nur ein Instrument, den Zähler, anzusehen hat, und weil man die Zeit mittels Arretieruhr auf Fünftelsekunden ablesen kann.

49. **Tachometer.** Tachometer geben die augenblickliche Geschwindigkeit der Maschine, ihre momentane Umlaufzahl pro Minute, durch Ablesung eines

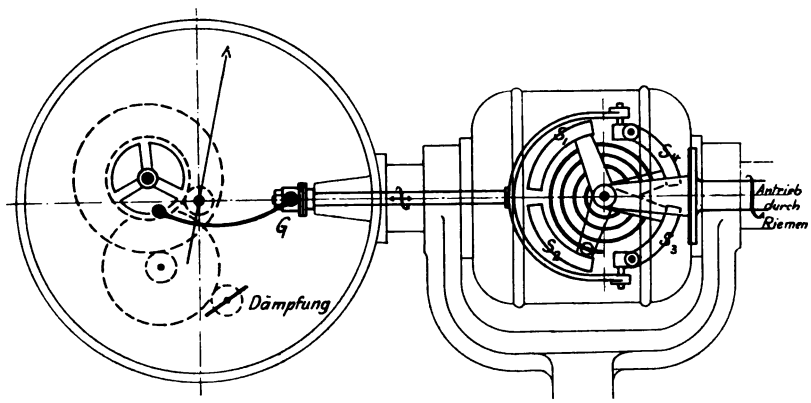


Fig. 36. Tachometer.

Zeigers. Das Mittel dazu ist die Zentrifugalkraft, welche einen Schwungkörper, entgegen der Kraft einer Feder, um so weiter von seiner Drehachse entfernt, je schneller diese Achse des Tachometers umläuft: das Tachometer ist ein kleiner Federregulator, und ähnelt in der Wirkung den Regulatoren der Dampfmaschinen.

Tachometergetriebe sind in den Fig. 36 und 37 wiedergegeben: In Fig. 36 bilden die Schwungmassen S_1 und S_3, andererseits S_2 und S_4

je ein Gußstück. Die Spiralfeder ist mit dem äußeren Ende an S_2, mit dem inneren an S_1 befestigt und wird gespannt, wollen die Gewichte sich von der Rotationsachse entfernen. Fliegen die Gewichte der Federkraft entgegen auseinander, so wird, wie ersichtlich, der Zeiger bewegt. Ein Universalgelenk bei G läßt es zu, daß das Zeigergetriebe nicht mitrotieren braucht. Eine Dämpfung verhindert Zuckungen des Zeigers durch die Ungleichförmigkeit von Kolbenmaschinen. — In Fig. 37 stellt sich infolge der Rotation der Rotationskörper S, eine flache runde Scheibe, mehr oder weniger senkrecht zur Rotationsachse und spannt dabei die Schraubenfeder, welche einerseits an ihm, andererseits an der Rotationsachse fest ist. Die Bewegung wird wieder auf einen Zeiger übertragen, G ist ein Kugelgelenk.

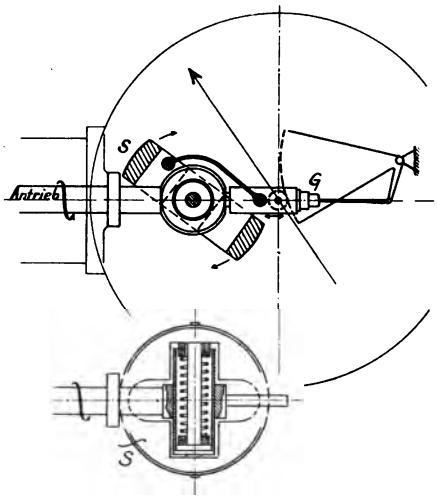


Fig. 37. Tachometer.

50. **Enger und weiter Meßbereich.** Die Theorie des Tachometers ist die der Zentrifugalregulatoren mit Federbelastung. Jeder Umdrehungszahl der Welle soll eine ganz bestimmte Stellung des Zeigers, also ein bestimmter Ausschlag der Schwungmassen entsprechen.

Beginnt die Welle sich zu drehen, so lösen sich die Schwungmassen von ihrem inneren Widerlager, sobald bei einer Tourenzahl n_0 die Zentrifugalkraft größer wird als die Vorspannung der Feder. Beim Auseinanderfliegen der Schwungmassen nimmt nun sowohl die Zentrifugalkraft als auch die ihr entgegenstehende Federkraft zu, und es ist nicht gesagt, daß sich bei einer Tourenzahl $n > n_0$ ein Gleichgewichtszustand überhaupt findet. Hatte nämlich beim Auseinanderfliegen die Zentrifugalkraft schneller zugenommen als die Federkraft, so gewinnt sie immer mehr und mehr die Oberhand über letztere und die Schwungmassen gehen gleich in die äußerste Stellung, bis ans äußere Widerlager. Die Federkraft muß also schneller zunehmen als die Zentrifugalkraft, und zwar muß das in jeder Pendellage der Fall sein.

Es ist überflüssig, diese Theorie hier näher zu erläutern, da man die Vorgänge in einem Tachometer niemals rechnerisch verfolgen wird, sondern ein schlecht gehendes eher durch Probieren in Ordnung bringt. Für die Auswahl eines Instruments aber ist vielleicht das Folgende gut zu beachten: Der innersten Lage der Schwungmassen entspricht eine Tourenzahl n_0, unter welcher das Tachometer nicht anzeigt; der äußersten Lage entspricht eine höhere Tourenzahl n_1, über welcher es nicht anzeigt. Jeder Zwischen-

lage der Schwungmassen entspricht eine Tourenzahl n zwischen n_0 und n_1. n_0 und n_1 können nun sehr voneinander verschieden sein, oder eng beieinander liegen: das Verhältnis $\frac{n_0}{n_1}$ kann groß oder klein sein. Je größer dieser Meßbereich $\frac{n_0}{n_1}$ des Tachometers ist, desto vielseitiger ist seine Anwendbarkeit für verschiedene Maschinen, aber desto enger rücken die Teilstriche aufeinander und desto ungenauer wird die Ablesung. Für eine Pumpe, die mit sehr verschiedenen Tourenzahlen laufen soll, braucht man einen weiten Meßbereich, für eine Betriebsmaschine genügt ein enger, welcher die Umlaufzahl genauer ablesen läßt. Ein zu enger Meßbereich aber hat zur Folge, daß die Ungleichförmigkeit der Maschine sich schon bemerkbar macht und der Zeiger bei jedem Umlauf hin und her schwankt, die Ablesung erschwerend. Daher benutzt man Meßbereiche von 1:2 bis 1:6, je nach Umständen. Einen viel engeren Meßbereich, etwa 8 : 10, hat nur der Hornsche Tachograph (§ 56), der gerade dazu dienen soll, die Ungleichförmigkeit einer Maschine zu kontrollieren. Dieser Hornsche Tachograph ist also, in der Sprache der Regulatortheorie, fast astatisch, die gewöhnlichen Tachometer müssen sehr statisch sein.

51. **Antrieb derselben.** Der Antrieb der Tachometer geschieht meist durch eine Riemenübertragung von der Welle aus, deren Umlaufzahl man feststellen will. Man wählt die Riemenscheibe des Tachometers so, daß das Tachometer passend schnell rotiert. Deshalb fertigt jede Tachometerfabrik nur ein oder wenige Tachometertypen mit bestimmter Umlaufzahl, und paßt sie mittels verschiedener Riemscheiben den zu messenden Umlaufzahlen an. Das Zifferblatt ist dann nicht nach der Tourenzahl des Tachometers, sondern der zu messenden Welle geteilt, und muß die Angabe der Riemenübersetzung enthalten.

Der Antriebriemen sei gleichmäßig, die Naht soll keine Verdickung bilden; anderenfalls stößt der Zeiger des Instruments. Ein Gummiriemen mit Hanfeinlage oder ein Hanfgurt sind brauchbar; ein Lederriemen muß dünn und geleimt, nicht genäht sein.

52. **Handtachometer.** Tachometer werden außer für ständigen Antrieb durch eine Maschine auch als Handinstrumente ausgeführt. Die Achse des Instruments endet dann in eine Dreikantspitze oder in einen Gummipfropfen, die in einen Körner am Ende der rotierenden Welle eingesetzt werden.

Handtachometer sollen für möglichst alle Maschinen brauchbar sein, vom Elektromotor mit einigen Tausend bis herab zur Pumpe mit nur vielleicht 40 Umläufen minutlich. Solch weiter Meßbereich würde enge Skalenteilung und ungenaue Ablesung bedingen. Man kann ein Tachometer, das für die Tourenzahlen von vielleicht 125 bis 500 gebaut ist, verwenden und durch Zahnräder für andere Tourenzahlen brauchbar machen. Solch

Tachometer hat etwa die Meßbereiche 40 bis 160; 125 bis 500; 400 bis 1600; 1250 bis 5000 und ist, je nachdem man die eine oder andere Zahnradübersetzung einschaltet, im ganzen von 40 bis 5000 Touren brauchbar. In all diesen Fällen macht die eigentliche Tachometerachse Tourenzahlen von 125 bis 500 in der Minute. Das Zifferblatt hat mehrere Numerierungen, deren eine oder andere man abliest.

Ein Wellenkörner nimmt die Dreikantspitze nur dann sicher mit, wenn er selbst dreikantig ausgearbeitet ist. Sonst tritt leicht Schlüpfung ein, ebenso wenn statt des Dreikants ein Gummipolster als Mitnehmer gebraucht wird. Sehr zuverlässig wird die Kupplung des Meßinstruments mit der Welle durch einen Draht von $^3/_4$ bis 1 mm Durchmesser erreicht, den man an beiden gut befestigt. Er tordiert sich erst stark, nimmt aber dann sicher mit, auch bei großer Länge und auch wenn er beliebig gebogen wird. Nur werden Ungleichmäßigkeiten des Ganges nicht sofort übertragen, er wirkt als Dämpfung. Solch Draht erspart das ermüdende Andrücken der Instrumente.

53. **Außergewöhnliche Tachometer.** Die angeführten Formen des Tachometers sind die üblichen. Für Sonderzwecke hat man manche andere benutzt, die sich vielfach mehr für stationären Betrieb eignen als zur Verwendung bei Versuchen.

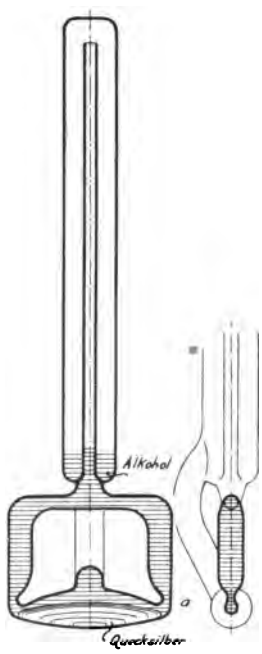


Fig. 38. Bifluid-Tachometer.

In einem um seine senkrechte Achse rotierenden zylindrischen Gefäß stellt sich die Oberfläche der Flüssigkeit in die Gestalt eines Rotationsparaboloids ein. Aus der Höhenlage des Scheitels kann man auf die Umlaufzahl schließen: Das Glas selbst ist mit einer Skala versehen, oder eine solche steht daneben still. Ältere Instrumente dieser Art sind die Gyrometer von Braun (Fabrikant: R. Gradenwitz, Berlin S.). In den Bifluid-Tachometern der Rheinischen Tachometerbau-Gesellschaft in Freiburg ist die Konstruktion vervollkommnet. Ein Glaskörper der Gestalt Fig. 38 rotiert um seine Achse. Im unteren Teil befindet sich etwas Quecksilber, darüber gefärbter Alkohol. Beim Rotieren tritt das Quecksilber in die seitlichen senkrechten Teile und treibt den Alkohol in dem mittleren engen Rohr hoch; seine Höhe gibt die Tourenzahl an. Die Tachometer sind für die verschiedensten Zwecke herstellbar. Die Breite des unteren Teils und die Menge des Quecksilbers, sowie die Weite des senkrechten Mittelrohrs bestimmen die mittlere Tourenzahl und den Meßbereich des Instruments,

die Stärke der Einschnürungen bei *a* bestimmt seine Trägheit. Diese Instrumente werden gelobt; die Reibung ist bei Flüssigkeiten vermieden, und da das Glas ganz zugeschmolzen ist, so ist Unveränderlichkeit der Angaben besser gesichert als bei Pendeltachometern.

Auf Lokomotiven sind die Tachometer Stößen ausgesetzt. Deshalb sind Instrumente besser geeignet, die nicht auf Massenwirkungen beruhen. Eine kleine Öl- oder Glyzerinpumpe saugt etwa aus einem Behälter, in den das Öl durch eine feine Düse hindurch wieder zurückläuft. In einem Windkessel zwischen Pumpe und Düse entsteht um so höherer Druck, je schneller die Pumpe umläuft, man kann also ein Manometer am Windkessel anbringen und direkt für Umläufe pro Minute einteilen.

Eine kleine magnetelektrische Maschine ohne Eisen im Anker erzeugt eine Spannung wachsend mit der Tourenzahl: man kann ein Voltmeter anschließen und für Umläufe eichen.

In allen diesen und manchem anderen Instrument wird die Instrumentenwelle von der zu untersuchenden durch Schnur, Gurt oder sonstwie angetrieben.

54. **Kritik: Zählwerk und Tachometer.** Zählwerk und Tachometer sind nicht gleichwertig. Sie ergänzen einander und man hat oft bei Versuchen beide Instrumente an der Maschine. In § 24 machten wir schon auf den Unterschied zwischen dem Tachometer, einem Skaleninstrumente, das die augenblickliche Geschwindigkeit anzeigt, und dem Zählwerk aufmerksam, welches die augenblicklichen Geschwindigkeiten aufaddiert und dann die mittlere Geschwindigkeit während einer Minute, einer Stunde, ausrechnen läßt. Für den Betrieb oder für die Einstellung einer Maschine ist das Tachometer viel bequemer; bei Dampfverbrauchsversuchen aber will man die mittlere Tourenzahl kennen, welche das Zählwerk ohne weiteres sehr genau gibt, das Tachometer viel ungenauer, wenn es nicht gut geeicht ist und wenn man es nicht sehr oft abliest.

55. **Ungleichförmigkeit.** Der Hornsche Tachograph bringt die Unregelmäßigkeiten im Gange einer Kraftmaschine oder überhaupt im Umlauf einer Welle auf einem Papierstreifen zur graphischen Darstellung.

Diese Unregelmäßigkeiten sind wesentlich von zweierlei Art. Bei einer Belastungsänderung ändert sich auch die Tourenzahl jeder Maschine, und zwar nimmt sie zu bei einer Entlastung, sie nimmt ab bei einer Mehrbelastung. Diesem natürlichen Vorgang wirkt der Regulator entgegen, der die Aufgabe hat, die Maschine auf etwa der gleichen Tourenzahl bei allen Belastungen zu halten, ihr diese aufzuzwingen. Bis das dem Regulator gelingt, dauert einige Zeit, und die Tourenzahl der Maschine schwankt daher bei einer Belastungsänderung auf und ab, um so weniger, je besser die Regulierung wirkt. Diese Schwankungen verzeichnet der Tachograph und untersucht dadurch die Güte der Regulierung.

Außerdem weisen diejenigen Kraftmaschinen, die mit Kolben arbeiten, Unregelmäßigkeiten innerhalb der einzelnen Umdrehung auf, die man

als ihre Ungleichförmigkeit bezeichnet. Sie rühren daher, daß die treibende Kraft periodisch wirkt, in den Totpunkten oft Null wird, während der Widerstand konstant oder doch nach anderem Gesetz veränderlich ist. Diese Ungleichförmigkeit in mäßigen Grenzen zu halten, ist wesentlich die Aufgabe des Schwungrades. Der Tachograph soll auch den Ungleichförmigkeitsgrad feststellen können.

Die Größe beider Unregelmäßigkeiten kann man in Prozenten der mittleren Geschwindigkeit angeben. Bei den Regulierschwankungen ist dies auch üblich, und zwar sagt man dann, die Maschine habe eine Schwankung von 2 % in der Tourenzahl gemacht, wenn ihre Tourenzahl bis auf 2 % unter oder über die normale gesunken war. Reguliert nun der Regulator zu weit, so kann dieser Schwankung eine, meist kleinere, nach der andern Seite folgen: Daraus folgt, daß eine Maschine bei „2 %“ Schwankung insgesamt Änderungen im Betrage von etwa 3 bis 4 % machen wird. — Den Ungleichförmigkeitsgrad innerhalb der einzelnen Umdrehung gibt man seltener in Prozenten, meist in Bruchteilen der mittleren Tourenzahl: es ist aber zu beachten, daß man hier die ganze Schwingung, vom Höchswert bis zum Niedrigstwert, ins Verhältnis zur mittleren Tourenzahl setzt, nach der Formel

Ungleichförmigkeitsgrad $\delta = \frac{v_{max} - v_{min}}{v_{mitt}}$. Abgesehen von dieser inkonsequent verschiedenen Bezeichnungsweise ist natürlich $1\,\% = \frac{1}{100}$; $2\,\% = \frac{1}{50}$ usf.

56. **Tachograph.** Der Hornsche Tachograph ist ein schreibendes Tachometer. Von der zu untersuchenden Welle wird durch Schnurtrieb ein Papierstreifen vorwärtsbewegt. Ein anderer Trieb, aus dünnem Leder geklebt, oder aus Hanfgurt, treibt die Tachometerwelle. Der Ausschlag der Schwungmassen wird nicht auf einen Zeiger übertragen, sondern auf ein Schreibzeug, das auf dem Papier Kurven verzeichnet. Man richtet den Antrieb der Schwunggewichte so ein, daß die Tachographenachse bei normaler Tourenzahl der zu untersuchenden Maschine 500 Umläufe minutlich macht. Das Schwunggetriebe ist so bemessen, daß der Schreibstift dann in der Mitte des Papiers steht: seine Ausschläge von der Mitte bedeuten Ungleichmäßigkeiten im Gange der Antriebwelle und lassen auf dem Papier Kurven verzeichnen. Fig. 52 gibt einen solchen Streifen wieder. Man sieht, daß die Skala nur bis zu 10 %, oft auch nur bis 5 % über oder unter die normale Tourenzahl reicht, er hat also in der Sprache der Tachometertechnik einen nur kleinen Meßbereich, in der Sprache der Regulatortheorie nähert er sich der Astasie. Das ist nötig, um kleine Schwankungen noch deutlich darzustellen. Damit auch schnelle Schwankungen gut dargestellt werden, sind die Massen des Hebelwerks möglichst klein zu halten. Trotzdem wird der Schreibstift den Vorgängen in der Maschine etwas nachhinken. Erstens teilt sich die Geschwindigkeitsänderung durch den Gurttrieb hindurch nicht momentan dem Instrument mit, zweitens ändert der Schreibstift seine

Stellung erst etwas später, als die Tachographenwelle ihre Geschwindigkeit ändert. Daher eignet sich der Tachograph zur Darstellung der Schwankungen bei Belastungsänderungen, weil sich diese über mehrere Umläufe der Maschine erstrecken. Den Schwankungen innerhalb des einzelnen Umlaufs kann er nicht so folgen, daß man wirklich Rückschlüsse auf den Verlauf der Geschwindigkeit daraus ziehen könnte, namentlich auch deshalb nicht, weil der antreibende Riemen oder Gurt ungleichmäßig ist und dadurch schon Schwingungen erzeugt werden. Die Kurven, Fig. 39, sind an der gleichen Maschine, eine mit Gurtantrieb, eine mit Riemen aufgenommen.

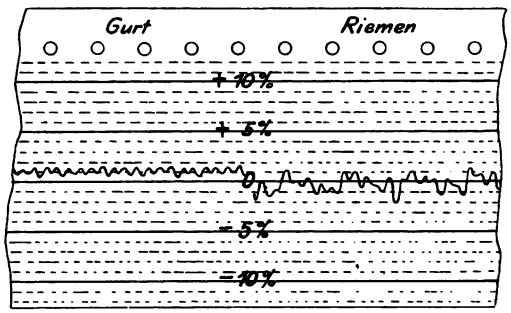


Fig. 39.

Das Tachogramm einer Gasmaschine stellt Fig. 40 dar. Wenn auch die Schwankungen innerhalb eines Umlaufs deutlich erkennbar sind, so werden sie doch, der Größe nach, nicht exakt wiedergegeben sein. Man muß sehr große und dabei leichte Riemenscheiben verwenden (200 mm Durchmesser oder mehr).

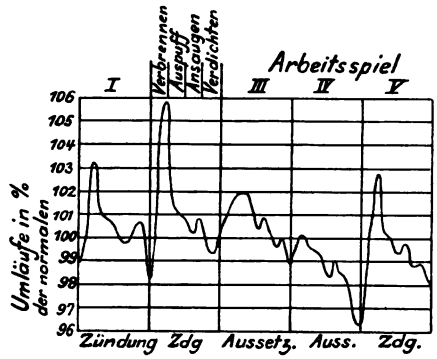


Fig. 40.

Daß der Papierstreifen von der Maschine angetrieben, also bei Tourenschwankungen nicht gleichförmig abgewickelt wird, ist erst dann ein bedeutender Fehler, wenn die Schwankungen groß werden, sagen wir, mehr als 10 % der Tourenzahl ausmachen. Man treibe den Papierstreifen dann durch Uhrwerk oder Elektromotor.

Der Tachograph ist das übliche Mittel, die Schwankungen in der Umlaufzahl der Maschine zu bestimmen. Es gibt genauere, meist unbequeme Methoden, über welche man sich aus der Literatur informieren kann.

57. **Woltmannscher Flügel.** Das vornehmste Instrument zur Messung von Wassergeschwindigkeiten in Flußläufen, Turbinengerinnen u. dgl. ist der Woltmannsche hydrometrische Flügel (Fig. 41 und 42). Der arbeitende Teil ist

das Flügelrad *A*, von 5 bis 25 cm Durchmesser, welches wie ein Schiffspropeller geformt ist: die Schaufeln sind Teile von Schraubenflächen. Wenn nun das Wasser in der Pfeilrichtung fließt, so dreht es das Rad herum, um so schneller, je schneller es fließt. Aus der minutlichen Umlaufzahl des Flügelrades kann man also auf die Wassergeschwindigkeit schließen.

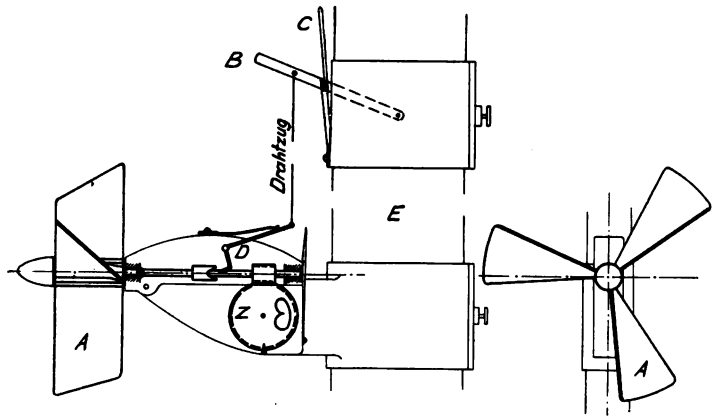


Fig. 41. Hydrometrischer Flügel, mechanisch.

Um die Umlaufzahl des Rades zu zählen, ist in Fig. 41 ein Umlaufzähler *Z* angeschlossen, der Art, wie in Fig. 35 dargestellt war: die Schnecke greift in zwei Zahnräder mit 100 und 101 Zähnen, deren Gangdifferenz die Hunderte von Umläufen angibt. Ist der Flügel unter Wasser

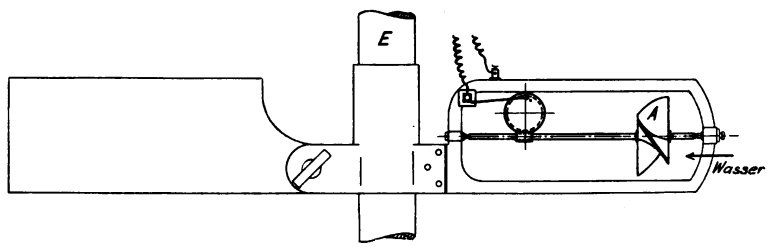


Fig. 42. Elektrischer Flügel.

gebracht, so kann man die Arretierung *D* durch Heben von *B* lösen und nach gewisser Zeit durch Drücken auf *C* wieder einfallen lassen. Man nimmt den Flügel nun heraus und liest die Zahl der Umläufe ab. Bequemer ist die Umlaufzählung bei Fig. 42; das Schneckenrad schließt nach je 50 oder je 100 Umläufen des Meßrades einen elektrischen Kontakt, und man bestimmt mittels Arretieruhr die Zeit zwischen zwei dadurch über Wasser bewirkten Glockensignalen. Diese Meßart ist genauer als die erstgenannte,

weil der Flügel beim Beginn der Messung schon in Gang ist, und weil die Zeitbestimmung mittels Arretieruhr sehr sicher ist; sie ist auch bequemer, weil man den Flügel zwischen mehreren Messungen nicht aus dem Wasser zu nehmen braucht.

Das Instrument steckt man mit der Hülse über einen Stab E, der auf der Gerinnesohle aufsteht, und an dem man es auf und ab schieben und in passender Höhe befestigen kann.

58. **Theorie; Flügelgleichung.** Hätte ein hydrometrischer Flügel gar keine Lagerreibung, und wären die Flügel genaue Schrauben von sehr geringer Wanddicke, so würde sich, sobald das Wasser fließt, der Flügel durch das Wasser hindurchwinden, ohne die Wasserbewegung im geringsten zu stören. Er selbst würde so schnell umlaufen, daß er sich durch das Wasser hindurchschraubt, er müßte also einen Umlauf machen in derselben Zeit, in der das Wasser um die Ganghöhe der Schraube vorgerückt ist, wie ja eine Mutter auf einer Schraube um eine Ganghöhe bei jeder Umdrehung vorrückt. Das wäre ein idealer hydrometrischer Flügel. Er machte offenbar bei doppelter Wassergeschwindigkeit w die doppelte Umlaufzahl n in der Minute, es wäre also $w = a \cdot n$, wo a eine von der Ganghöhe abhängige Konstante des Instruments ist.

In Wirklichkeit hat ein Flügel Reibung in seinen Lagern und in der Übersetzung zum Zählwerk. Diese bewirkt, daß der Flügel bei sehr langsamer Wasserbewegung überhaupt nicht umläuft und weiterhin um einen gewissen Betrag hinter der theoretischen Umlaufzahl zurückbleibt, um so viel nämlich, daß die dadurch entstehende Schlüpfung und der entstehende Wasserstoß zum Überwinden der Reibung ausreicht. Die Wassergeschwindigkeit ist um einen gewissen Betrag größer, als man nach der Formel $w = a \cdot n$ erhalten würde: es ist

$$w = an + b\,. \tag{1}$$

Dabei wird b etwa konstant sein, da die Reibung annähernd konstant ist. b ist, wie man sieht, die kleinste Wassergeschwindigkeit, welche nötig ist, um den Flügel überhaupt in Gang zu bringen: die Anlaufgeschwindigkeit.

Die Formel $w = an + b$ ist es, welche meist den Messungen mit dem Woltmannschen Flügel zugrunde gelegt wird. Umständlichere Gleichungen gibt es, welche noch sekundäre Einflüsse, insbesondere die Störungen, berücksichtigen wollen, die durch die Befestigungsweise der Flügel an der Achse hervorgerufen werden. Wir verweisen dieserhalb auf Z. d. V. d. I. 1895, S. 917. Für ganz kleine Wassergeschwindigkeiten, 0,1 bis 0,3 $\frac{\text{m}}{\text{sec}}$, wo der Flügel verhältnismäßig langsamer läuft, muß man auf die umständlicheren Gleichungen zurückgreifen, sonst genügt die einfache.

Beobachtet man bei elektrischer Zählung die Zeit t für eine gewisse Anzahl x von Umdrehungen, so gibt man der Flügelgleichung zweckmäßig eine andere Form. Schreibt man die Gleichung (1): $w = a \cdot \frac{x}{t} + b$, so wird $w = \frac{ax}{t} + b$, und da ax für ein Instrument konstant ist, so können wir schreiben

$$w = \frac{c}{t} + b; \tag{2}$$

hierin sind nun b und c die Flügelkonstanten.

59. **Eichung der Flügel.** Welche Flügelgleichung man aber auch annehmen möge, stets wird man die Koeffizienten, also a und b oder b und c, durch Versuche bestimmen müssen. Man schleppt dazu den Flügel mit bekannter, meßbarer Geschwindigkeit durch ruhendes Wasser, die Relativbewegung ist dann dieselbe, wie wenn der Flügel an Ort bleibt und das Wasser fließt. Die Ausführung zweier solcher Versuche bei verschiedenen Geschwindigkeiten genügt, um die zwei Koeffizienten zu berechnen, man wird aber mehr Versuche machen, um genauere Werte derselben zu erhalten. Zur rechnerischen Bestimmung wäre dann die Kenntnis der Methode der kleinsten Quadrate erforderlich.

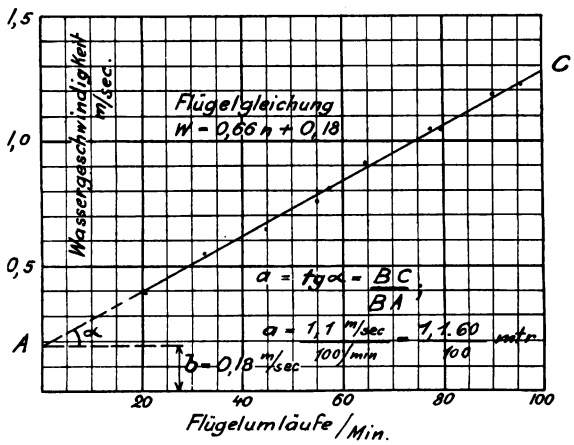


Fig. 43.

Für unsere Zwecke wird meist die graphische Bestimmung der Koeffizienten aus den Eichresultaten genügen: man trägt die sekundliche oder minutliche Umlaufzahl des Flügels bei verschiedenen Wassergeschwindigkeiten auf und erhält die Punkte etwa wie in Fig. 43. Man kann die Gerade AC hindurchlegen und dann a und b, wie in der Figur angegeben, entnehmen. Oder man kann der Koeffizienten und überhaupt jeder Flügelgleichung entraten und einfach ein Bild, wie Fig. 43, als rein empirische Darstellung der Wirkungsweise des Flügels ansehen.

Bassins zum Eichen der Flügel durch Schleppversuche sind an verschiedenen Hochschulen, so in München, Berlin, Dresden, Hannover, vorhanden. Bei Bedarf wird man besser tun, einen Flügel dort prüfen zu

lassen, als ihn mit primitiven Mitteln selbst zu eichen. Von den Fabrikanten wird nicht immer der einzelne Flügel durch Schleppen geeicht, sondern nur durch Vergleichen mit einem Normalflügel. Das ist einfacher und dabei zuverlässiger als ein primitiv angeordneter Schleppversuch; man beachte aber, daß wirklich beide Flügel die gleiche Wassergeschwindigkeit erhalten.

60. **Pitot-Rohr.** Die Pitotsche Röhre zum Messen von Wassergeschwindigkeiten beruht auf folgendem Prinzip: Wenn aus einer Öffnung in der Wand eines Gefäßes Wasser unter dem Einfluß der Schwerkraft austritt, so geschieht dies bekanntlich mit einer Geschwindigkeit $w = \sqrt{2\,g\,h}$, worin $g = 9{,}81\,\frac{\text{m}}{\text{sec}^2}$ die Schwerebeschleunigung und h die Standhöhe des Wassers über der Lochmitte ist. Die Geschwindigkeit $w = \sqrt{2\,g\,h}$ und die Druckhöhe h sind gewissermaßen äquivalent. Wenn man nun umgekehrt einem Wasserstrom einen Widerstand entgegensetzt, so daß derselbe aufgehalten wird, so wird dadurch die Geschwindigkeit w in eine Druckhöhe umgesetzt, die sich aus der gleichen Formel berechnen läßt.

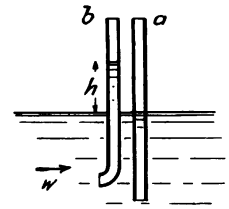


Fig. 44.

Während daher in einem unten gerade abgeschnittenen Rohre, das man in Wasser taucht, das Wasser sich kommunizierend in die Höhe des äußeren Spiegels einstellt, a in Fig. 44, so wird sich in einem dem Strom entgegen gekrümmten Rohre b der Wasserstrom fangen und die Einstellung auf ein höheres Niveau veranlassen. Der Unterschied beider Niveaus ist die der Geschwindigkeit w äquivalente Druckhöhe, $h = \frac{w^2}{2\,g}$.

Das ist die Theorie der Pitotschen Röhre, die in dieser Weise den Unterschied h zwischen statischer und dynamischer Druckhöhe mißt und zur Berechnung der Wassergeschwindigkeit benutzt. Sie besteht also aus zwei Rohren, deren eines gerade abgeschnitten, deren anderes dem Strom entgegen rechtwinklig umgebogen ist (Fig. 45). Um die Ablesung in bequemer Höhe über dem Wasser zu haben, sind die Rohre vereinigt, und durch einen Gummischlauch mit Mundstück kann man, durch einen Hahn H_1 hindurch, das Wasser in beiden Röhren emporsaugen. Dann schließt man den Hahn, und die Wasserstände in den Rohren geben unmittelbar die Druckdifferenz. Hähne H_2 und H_3 hindern das Wasser am Auslaufen, wenn man die Röhre aus dem Wasser nimmt.

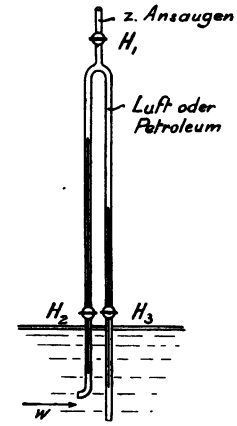


Fig. 45. Pitot-Rohr.

Hier ist nun der obere Teil ein Differentialmanometer, und man kann

es ganz vom eigentlichen Pitot-Rohr trennen. Solche Differentialmanometer sind im Kapitel über Spannungsmessung beschrieben: ihre beiden Schenkel werden durch zwei Gummischläuche mit dem Pitot-Rohr selbst verbunden.

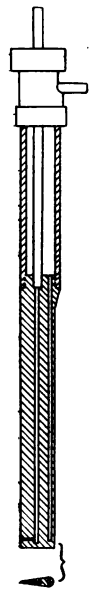


Fig. 46.

Für kleine zu messende Geschwindigkeiten ist die Wassersäule zu klein zum Ablesen: man vergrößert den Ausschlag dadurch, daß man in Fig. 45 den Raum über den Wassersäulen nicht voll Luft läßt, sondern mit einer Flüssigkeit anfüllt, die leichter als Wasser ist. Je weniger ihr spezifisches Gewicht sich von dem des Wassers unterscheidet, desto mehr wird der Ausschlag der Wassersäulen vergrößert — wie ebenfalls im Kapitel über Spannungsmessung (§ 118) näher ausgeführt ist.

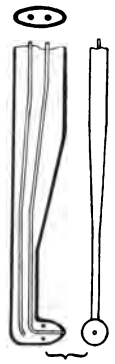


Fig. 47.
Pitot-Rohre.

Man stellt Pitotsche Röhren wohl nach Anleitung von Fig. 45 aus Glas her. Man hat sie aber auch in Messing ausgeführt und ihnen eine der in Fig. 46—48 dargestellten Formen gegeben, die sich, weil sie klein ausführbar sind, zur Messung der Wassergeschwindigkeit an ganz bestimmten Punkten eignen. Man sieht, daß besondere Sorgfalt auf die Messung des statischen Druckes verwendet ist: die Anbringung mehrerer Öffnungen nach verschiedenen Seiten hin soll eine vom Wasserstrom etwa ausgeübte Saugwirkung unschädlich machen. Oben werden sie mit irgendeinem empfindlichen Differentialmanometer durch zwei Gummischläuche verbunden. Man hat darauf zu achten, daß in den Schläuchen keine Luftblasen bleiben.

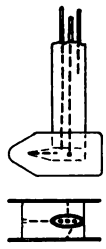


Fig. 48.

61. **Ausführungsformen; Schwierigkeiten; Eichung.** Beim Arbeiten mit Pitotschen Röhren zeigt es sich, daß die vom Manometer angezeigte Wasserstandsdifferenz nicht die Geschwindigkeitshöhe ist; es ist nicht $w = \sqrt{2gh}$, vielmehr ist $w = \zeta\sqrt{2gh}$, wo ζ für ein und dasselbe Instrument bei allen Geschwindigkeiten ziemlich konstant zu sein pflegt, für verschiedene Instrumente aber Werte zwischen 0,6 bis 1, ja auch Werte über 1 haben kann. Das ist das Ergebnis von Schleppversuchen, die man mit der Pitotschen Röhre ebenso ausführen kann, wie dies beim Woltmannschen Flügel angegeben wurde. Solche Schleppversuche muß man daher für jedes Instrument ausführen, um die Größe von ζ zu ermitteln; am besten eicht man das Instrument auch noch bei verschiedenen Geschwindigkeiten, um die Konstanz von ζ zu prüfen.

Der Theorie nach sollte $\zeta = 1$ sein. Die Abweichungen scheinen an der mangelhaften Messung des statischen Druckes p zu liegen. Die dem

Wasser entgegenstehende Öffnung empfängt richtig den Druck $p + \sqrt{2gh}$, wie die Theorie fordert. An den seitlichen Öffnungen aber findet je nach ihrer Lage auch noch ein Drücken oder Saugen statt, wohl durch Wirbelbildungen im Wasser — das kann man ja beobachten, wenn man ein Glasrohr senkrecht in einen Wasserstrom hält, der Wasserstrom saugt, wie Fig. 49 andeutet. Bessere Messungen des statischen Druckes kann man, so scheint es, erzielen, wenn man (Fig. 46—48) die den Druck entnehmende Bohrung in eine glatte Wand legt und die Ränder der Bohrung sorgfältig von Grat befreit. Das Pitot-Rohr, Fig. 48, hat außer der dynamischen noch zwei statische Mündungen, die in ebenen, parallelen Wänden liegen. Das Manometer hat drei Wasserstände, und die beiden statischen müssen gleiche Höhe haben, dann sind die ebenen Wände in Richtung der Wasserströmung.

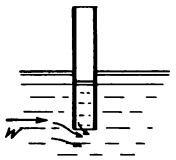


Fig. 49.

Bei solchen Vorsichtsmaßregeln in Messung des statischen Drucks mag man, einfach nach der Formel $w = \sqrt{2gh}$, Resultate erhalten, die nicht mehr als 5 % vom wahren Wert abweichen. Im allgemeinen aber fassen wir die Bemerkungen dieses Paragraphen dahin zusammen, daß das Pitot-Rohr ein brauchbares Meßinstrument nur ist, wenn man es, durch Schleppversuche oder durch Vergleich mit einem anderen geeichten Rohr oder Woltmannschen Flügel, empirisch eicht. Dann hat es vor dem Woltmannschen Flügel den Vorzug, nur eine einfache Ablesung zu erfordern, und die Geschwindigkeit an einem einzelnen Punkt, auch etwa im Innern von Rohren messen zu lassen. Wo man ihn aber anwenden kann, ist der Woltmannsche Flügel vorzuziehen.

Erwähnt sei endlich, daß man auch Pitot-Rohre nach dem Schema der Fig. 50 ausführt: von zwei Öffnungen ist eine dem Wasserstrom zu-, die andere ihm abgekehrt; eine mißt daher die Summe aus statischer und dynamischer Druckhöhe $p + \frac{w^2}{2g}$, die andere die Differenz der gleichen Größen $p - \frac{w^2}{2g}$; der Unterschied beider ist $2 \cdot \frac{w^2}{2g}$, und man hätte also die Messung des statischen Druckes umgangen. Die Annahme indes, daß in dieser Form das Pitot-Rohr ohne Eichung verwendbar sei, trifft nicht zu. Auch hier üben Wirbelbildungen an den Rohren einen theoretisch nicht bestimmbaren Einfluß, den eben erst die Eichung bestimmen soll: so lehrt die Erfahrung.

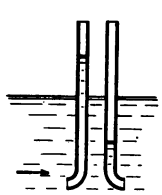


Fig. 50.

62. **Anemometer; Pitot-Rohr für Luftmessung.** Die Messung der Luftgeschwindigkeit erfolgt ganz wie die der Wassergeschwindigkeit mit Anemometern, die den Woltmannschen Flügeln analog sind, oder mit Pitotschen Röhren.

Anemometer unterscheiden sich von den Woltmannschen Flügeln nur dadurch, daß das treibende Flügelrad leichter und kleiner ist, wie ja auch

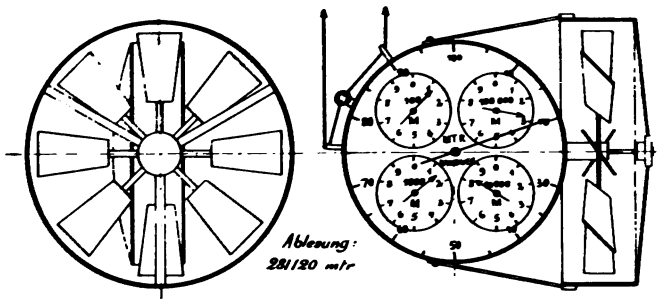


Fig. 51. Anemometer.

die Masse des zu messenden Mediums geringer ist. Fig. 51 gibt ein Anemometer wieder. Das Flügelrad läuft dauernd, der Zeiger wird durch Ziehen an den Schnüren an- und abgekuppelt, er gibt Meter Windweg an; zur Messung der Geschwindigkeit liest man die Uhr gleichzeitig ab, beim Ein- und beim Ausrücken. An Stelle des Schraubenrades verwendet man oft das Schalenkreuz, Fig. 51a, als treibenden Teil; es läuft um, weil die Luft an der konvexen Fläche der Schalen abgleitet, in der konkaven sich fängt, auf letztere also stärker drückt.

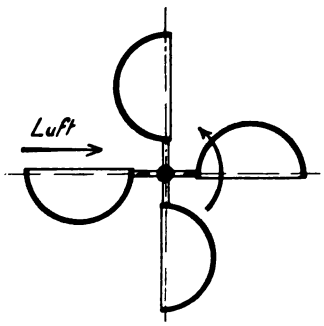


Fig. 51a.

Zur Eichung der Anemometer kann man nicht Schleppversuche machen, weil es sich um zu große Geschwindigkeiten handelt. Man setzt das Instrument auf das Ende eines langen hölzernen Armes, den man in ruhender Luft um seine Mitte rotieren läßt. Aus der Länge des Armes und der Tourenzahl der Rotation findet man die Geschwindigkeit, die man dem Anemometer erteilt hatte. Daß die Bewegung des Anemometers krummlinig ist, hat bei passender Anordnung des Instrumentes (Achse eines Schalenkreuzes parallel zur Längsrichtung des hölzernen Armes) wenig Einfluß.

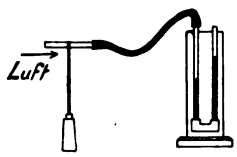


Fig. 52.

Pitotsche Röhren kann man für Luft ebenso verwenden, wie für Wasser (Fig. 52); man mißt die Geschwindigkeitshöhe in mm Wassersäule mittels eines kleinen Wassermanometers; die Formel $w = \sqrt{2gh}$ aber versteht unter h eine Luftsäule, d. h. eine Säule von derjenigen Substanz, deren Geschwindig-

keit man mißt. Denkt man sich nun im luftleeren Raum eine Wassersäule im einen, eine Luftsäule im anderen Schenkel eines kommunizierenden Röhrenpaares und beide Säulen im Gleichgewicht, so verhalten sich ihre beiden Höhen umgekehrt wie die spezifischen Gewichte. Bei 0° und 760 mm Qu. wiegt trockne Luft 1,293 $\frac{\text{kg}}{\text{cbm}}$, Wasser wiegt 1000 $\frac{\text{kg}}{\text{cbm}}$; also ist 1 mm Wassersäule $= \frac{1000}{1{,}293} \cdot \frac{1}{1000} = 0{,}773$ m Luftsäule; bei anderen Temperaturen und anderen Drucken wird man die Umrechnung leicht finden. Daß Feuchtigkeit das spezifische Gewicht der Luft stark beeinflußt, wird in § 65 besprochen werden: man muß also erforderlichenfalls die Feuchtigkeit der Luft bestimmen.

Man kann auch, nach Recknagel, eine Stauscheibe in den Luftstrom bringen, das ist eine kreisförmige Scheibe von etwa 1 cm Durchmesser. Vor ihr staut sich der Luftstrom und erzeugt Überdruck, an ihrer Rückseite entsteht Unterdruck. Im Wesen ist die Vorrichtung dasselbe wie ein Pitot-Rohr. Man kann die Druckdifferenz vor und hinter der Scheibe messen, da in der Scheibenmitte feine Bohrungen sind, die zu einem Differentialmanometer führen. Nach Versuchen von Recknagel ist die entstehende Druckdifferenz, gemessen in Metern Luftsäure, nicht $2 \cdot \frac{w^2}{2g}$, wie sie theoretisch sein sollte, sondern kleiner, und zwar immer $1{,}37 \frac{w^2}{2g}$. In der Lüftungstechnik ist die Stauscheibe in Verbindung mit einem empfindlichen, ebenfalls von Recknagel angegebenen Differentialmanometer (§ 118) recht gebräuchlich.

VIII. Messung der Stoffmenge.

63. **Einheiten; Gewicht, Volumen, spezifisches Gewicht.** Die Angabe der Menge eines gemessenen Stoffes, sei er fest, flüssig oder gasförmig, kann nach Gewicht oder im Raummaß erfolgen.

Die Angabe nach Gewicht geschieht meist in Kilogrammen und dessen Untereinheiten. Das Kilogramm [kg] ist eine der drei Grundeinheiten des technischen Maßsystems. In Deutschland ist auch das Pfund, 1 Pfund = 500 g = 0,5 kg, ein gesetzliches Maß. 100 Pfund = 50 kg heißen ein Zentner. Gelegentlich bezeichnet man 100 kg als Doppelzentner, auch wohl als Meterzentner, d. h. Zentner im metrischen System. Das englische Pfund ist beträchtlich kleiner als das deutsche, 1 Pfund engl. = 453 g.

Die Angabe nach Volumen erfolgt in Kubikmetern (abgekürzt cbm, Dimension [m^3]) oder den bekannten Untereinheiten desselben.

Für einen und denselben Stoff und unter bestimmten Bedingungen für Druck und Temperatur sind die beiden Angaben voneinander abhängig. Es ist nämlich $G = V \cdot \gamma$, wenn wir mit G das Gewicht und mit V das Volumen bezeichnen; γ ist das spezifische Gewicht des Stoffes. Das spezifische Gewicht ist im technischen Maßsystem das Gewicht eines Kubikmeters des Stoffes. Aus $\gamma = \frac{G \text{ kg}}{V \text{ cbm}}$ folgt, daß die Einheit des spezifischen Gewichts 1 $\frac{\text{kg}}{\text{cbm}}$ ist. Seine Dimension ist $\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right]$.

In der Physik ist es üblich, das spezifische Gewicht als absolute Zahl zu geben. Diese Zahl gibt an, wievielmal schwerer der Körper ist, als das gleiche Volumen Wasser von 4° C. Diese Art der Angabe fügt sich dem technischen Maßsystem nicht ein, ist aber sehr bequem. Das spezifische Gewicht Eins der Physik wird in der technischen Mechanik als 1000 $\frac{\text{kg}}{\text{cbm}}$ wiedergegeben. Übrigens heißt in korrekt physikalischer Sprache diese Zahl nicht spezifisches Gewicht, sondern Dichte.

Es wird nützlich sein, besonders darauf hinzuweisen, daß man die Dichte der Flüssigkeiten (und festen Körper), gleichgültig welche Temperatur sie gerade haben, immer auf Wasser von 4° als Normalie bezieht. Man ist bei der Messung häufig nur in der Lage, das Gewicht einer zu untersuchenden Flüssigkeit mit dem Gewicht des Wassers von gleicher Temperatur zu vergleichen. Dann wird also eine Korrektion nötig. Ist 0,810 das gemessene Relativgewicht eines Alkohols bei 25° C, bezogen auf Wasser von 25° C, so entnehmen wir der Fig. 53, daß Wasser von 25° C 997 $\frac{\text{kg}}{\text{cbm}}$ wiegt, also ein Relativgewicht 0,997 hat, bezogen auf Wasser von 4°; dessen Dichte ist 0,997, die des Alkohols bei 25° ist also $0{,}997 \cdot 0{,}810 = 0{,}808$ oder sein spezifisches Gewicht 808 $\frac{\text{kg}}{\text{cbm}}$. — Man vergleiche hierüber auch § 67.

64. **Einfluß der Temperatur.** Hiernach ist es gleichgültig, ob man bei einer Messung das Volumen oder das Gewicht bestimmt; man mißt dasjenige von beiden, welches bequemer oder sicherer zu messen ist, und kann die andere Angabe, braucht man sie, daraus berechnen: $G = V \cdot \gamma$.

Das spezifische Gewicht γ kann man dabei Tabellenwerken entnehmen oder durch eine der weiterhin zu besprechenden Methoden bestimmen.

γ ist indessen von der Temperatur abhängig. (Der Druck hat bei Flüssigkeiten und festen Körpern wenig Einfluß.) Die Längenänderung für 1° Temperaturzunahme, gegeben in Bruchteilen der ursprünglichen Länge, heißt Wärmeausdehnungskoeffizient α. Eine Fläche nimmt bei 1° Temperaturzunahme um das Doppelte, der Rauminhalt um das Dreifache von α zu. Der kubische Ausdehnungskoeffizient ist 3α, nur er kommt bei Flüssig-

keiten in Frage. Entnimmt man das spezifische Gewicht γ_0 einer Flüssigkeit bei einer Normaltemperatur dem Tabellenwerk, so ist das spezifische Gewicht bei einer um Δt höheren Temperatur $\gamma = \frac{\gamma_0}{1 + 3\,\alpha \cdot \Delta t}$.

Weil bei Flüssigkeiten immer der dreifache Ausdehnungskoeffizient in Frage kommt, so gelangt man bald an jene Grenze, wo man die Wärmeausdehnung nicht vernachlässigen darf. Will man etwa beim Abkühlungsversuch an einer Kälteanlage die Solemenge feststellen, welche in der eisernen Verdampferkufe sich befindet, so mißt man nach, wie tief die Sole in der Kufe steht. Man tut das zur Sicherheit vor und nach dem Versuch; das zweite Mal ist aber die Temperatur niedriger — eine Folge des Arbeitens der Kältemaschine. Die Grundfläche der Kufe sei vor dem Versuch F (laut Werkzeichnung), nachher wegen der Abkühlung nur f; die gemessenen Standhöhen der Sole seien H und h, das Volumen der Sole

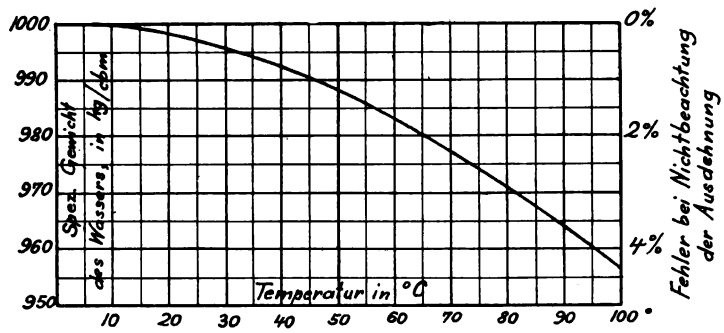


Fig. 53.

sei V und v. Dann ist $V = H \cdot F$ und $v = h \cdot f$; weiter ist $F = f(1 + 2\,\alpha_1)$ und $V = v(1 + 3\,\alpha_2)$, wobei $2\,\alpha_1 = 2 \cdot 0{,}000012$ der quadratische Ausdehnungskoeffizient des Eisens, $3\,\alpha_2 = 0{,}0004$ der kubische der Sole ist. Dann wird also $\frac{H}{h} = \frac{V}{v} \cdot \frac{f}{F} = \frac{1{,}0004}{1{,}000024} = 1{,}00037$; $H = 1{,}00037 \cdot h$. Das gilt für 1^0 Temperaturdifferenz: die Standhöhen in der Kufe werden bei 20^0 Temperaturdifferenz zwischen Anfang und Ende des Versuches um $^2/_3\,\%$ voneinander abweichen. Bei 2 m Tiefe findet man einen Unterschied von 13 mm zwischen beiden Messungen.

Bei warmem Wasser darf man das spezifische Gewicht nicht $\gamma = 1$ oder nicht $\gamma = 1000\,\frac{\text{kg}}{\text{cbm}}$ setzen; bei 70^0 Temperatur wäre der Fehler über 2 %! Bei kaltem Wasser hat freilich die Temperatur wenig Einfluß, weil die Änderungen in der Nähe des Maximums bei 4^0 klein sind. Das zeigt Fig. 53, welche die Abhängigkeit des spezifischen Gewichts von der

Temperatur darstellt. Wasser nimmt in dieser Hinsicht bekanntlich eine Ausnahmestellung ein.

65. **Reduziertes und unreduziertes Volumen bei Gasen. Einfluß der Feuchtigkeit.** Bei Gasen pflegt man die Angabe der Menge selten nach Kilogrammen zu machen. Wohl aber reduziert man die Volumenangaben auf die Normalspannung von 760 mm Quecksilbersäule und auf die Normaltemperatur von 0° C. Es ist zweckmäßig, stets anzudeuten, daß das Volumen auf Normalverhältnisse reduziert ist, indem man hinter die Volumenangabe den Zusatz $\left(\frac{760\text{ mm}}{0^\circ}\right)$ setzt, oder einfach $\left(\frac{760}{0}\right)$. Die Angabe des reduzierten Volumens ist einer Gewichtsangabe völlig gleichwertig, denn für trockene Luft ist ja beispielsweise 1 cbm $\left(\frac{760}{0}\right) = 1{,}293$ kg.

Wo man also Wassermengen nach Volumen angibt, muß man Luftmengen unreduziert lassen; wo man Wassermengen nach Gewicht angibt, muß man Luftmengen reduzieren — hierüber noch im nächsten Paragraphen weiteres.

Für die Reduktion selbst gilt die Formel (Gesetz von Mariotte und Gay-Lussac): reduziertes spezifisches Gewicht

$$\gamma_0 = \gamma \cdot \frac{273 + t}{273} \cdot \frac{760}{p},$$

oder reduziertes Volumen

$$V_0 = V \cdot \frac{273}{273 + t} \cdot \frac{p}{760},$$

worin γ und V die nicht reduzierten beobachteten Werte, t die bei der Beobachtung herrschende Temperatur und p der dabei herrschende absolute Druck (häufig der Barometerstand) ist.

Im englischen Maßsystem reduziert man die Gasmengen auf 30 Zoll Qu. = 761,99 mm Qu., und auf 32° Fahrenheit = 0° C.

Einfluß auf das spezifische Gewicht der Gase hat der in ihnen enthaltene Feuchtigkeitsgehalt. Wasserdampf ist nämlich nur reichlich halb so schwer wie Luft. Wie groß der Fehler ist, den man durch Nichtbeachtung der Feuchtigkeit begeht, dafür gibt folgendes einen Anhalt.

Temperatur 20°. Barometerstand 760 mm, d. i. Spannung der Luft plus der des in ihr enthaltenen Wasserdampfes. Trockene Luft wiegt $1{,}293 \cdot \frac{273}{273 + 20} = 1{,}205 \frac{\text{kg}}{\text{cbm}}$. Mit Feuchtigkeit gesättigte enthält bei dieser Temperatur im Kubikmeter (Dampftabellen) 0,017 kg Dampf. Dabei ist die Dampfspannung (Dampftabellen) 17 mm Qu., also bleiben 760 − 17 = 743 mm Qu. Luftspannung. Die in dem Kubikmeter enthaltene Luft wiegt daher

$$1{,}293 \cdot \frac{273}{273 + 20} \cdot \frac{743}{760} = 1{,}178 \frac{\text{kg}}{\text{cbm}}.$$

Die feuchte Luft als Ganzes wiegt also $1{,}178 + 0{,}017 = 1{,}195 \frac{kg}{cbm}$. Fehler bei Nichtberücksichtigung der Feuchtigkeit 0,5 %. Hätte die Luft 50 % Feuchtigkeit enthalten, so hätte sie $2{,}00 \frac{kg}{cbm}$ gewogen.

Temperatur 50°. Barometerstand 760 mm. Trockene Luft wiegt $1{,}093 \frac{kg}{cbm}$. In ganz feuchter wöge der Dampf $0{,}082 \frac{kg}{cbm}$ bei 92 mm Spannung; die Luft wöge bei 668 mm Spannung $0{,}961 \frac{kg}{cbm}$. Gesättigt feuchte Luft wöge $1{,}043 \frac{kg}{cbm}$, mittelfeuchte $1{,}068 \frac{kg}{cbm}$. Fehler durch Vernachlässigen der Feuchtigkeit 5 % bei gesättigter, 2,5 % bei mittelfeuchter Luft!

Bei warmer Luft ist eine Vernachlässigung der Feuchtigkeit unzulässig. Man rechne im Notfall mit mittelfeuchter Luft (vgl. Hütte, 18. Aufl. I. 290), deren spezifisches Gewicht bei 0° und 760 mm man 1,25 kg/cbm setzen kann.

66. **Wann Gewicht, wann Volumen angeben?** Wir haben gesehen, daß man Gewicht und Volumenangaben leicht ineinander überführen kann. Es fragt sich nun, wann man Angaben nach Gewicht, wann nach Volumen machen sollte. Für Gase ist die Frage die, wann man das Volumen auf Normaldruck und -temperatur reduzieren soll, wann nicht. Eine Umrechnung auf Gewicht und auf reduziertes Volumen ist nicht immer das richtige, wie man vielfach meint.

Bei Untersuchung einer Pumpe kommt es darauf an, ob dieselbe das Wasser auf eine gewisse Förderhöhe, in Metern gemessen, hebt oder ob sie es gegen eine gewisse in Atmosphären gemessene Spannung, in einen Akkumulator, in einen Dampfkessel hineinspeist. Im ersten Fall ist das geförderte Gewicht, im zweiten das Volumen für die erforderliche Arbeit der Pumpe maßgebend. Die Dimensionsformel besagt das: $1000 \text{ kg} \times 10 \text{ m} = 10000 \text{ m·kg}$; aber $1 \text{ cbm} \times 1 \text{ at} = 1 \text{ m}^3 \cdot 10000 \frac{kg}{m^2} = 10000 \text{ m·kg}$. Bei Förderung von Alkohol wird man hier kaum einen Fehler machen, weil man aufmerksam wird; aber bei warmem Wasser können Fehler von 2 % und mehr unterlaufen. Untersucht man also die Kesselspeisepumpe, so hat man die gespeiste Wassermenge in Kubikmetern, untersucht man den zugehörigen Dampfkessel, so hat man dieselbe Wassermenge in Kilogrammen anzugeben.

Ein bestimmter Luftkompressor saugt immer das gleiche Luftvolumen an, er stehe in der Ebene, wo der Barometerstand 760 mm Qu. ist, oder im Gebirge bei 700 mm Barometerstand, er arbeite im Sommer oder im

Winter. Für Beurteilung der Kompressorkonstruktion, etwa zur Bestimmung seines volumetrischen Wirkungsgrades, wäre es falsch, auf Normalverhältnisse zu reduzieren. Der Kompressor würde sonst in der Ebene andere Ergebnisse liefern als im Gebirge; im Bergwerk arbeitend könnte man selbst einen Wirkungsgrad über Eins herausrechnen. Handelt es sich aber darum, zu prüfen, ob der Kompressor der vorgeschriebenen Bedingung genügt, die nötige Luft für einen chemischen Prozeß zu liefern, der natürlich ein bestimmtes Luftgewicht erfordert, zu prüfen also, ob der Konstrukteur die Zylinderabmessungen genügend groß wählte, da er ja wußte, der Kompressor würde bei geringem Barometerstand oder bei hoher Temperatur arbeiten und da er ja den erreichbaren volumetrischen Wirkungsgrad kannte — handelt es sich darum, so wird man auf die Normalverhältnisse reduzieren müssen.

Ähnliche Überlegungen wird man, je nach den Verhältnissen, von Fall zu Fall anzustellen haben. Die Stoffmenge selbst, die Masse im Sinne der Physik, ist natürlich immer durch das Gewicht oder durch das reduzierte Volumen gegeben.

67. **Aräometer.** Bei festen Körpern kann man das spezifische Gewicht meist Tabellenwerken entnehmen. Kommt man in die Verlegenheit es zu bestimmen, so werden Physikbücher Anleitung geben.

Bei Flüssigkeiten bestimmt man das spezifische Gewicht mit Hilfe des Aräometers. Dieses (Fig. 54) besteht meist aus Glas, der weite Bauch ist hohl um Schwimmen zu ermöglichen, das Kügelchen unten ist mit Quecksilber oder sonstwie beschwert, um die senkrechte Lage zu sichern. Das Instrument taucht in die Flüssigkeit um so tiefer ein, je leichter die Flüssigkeit, je kleiner also ihr Auftrieb ist. Aus der Eintauchtiefe kann man mittels einer Skala in dem langen Rohrfortsatz auf das spezifische Gewicht schließen. — Um die Skala nicht zu lang zu erhalten, hat man für Flüssigkeiten von höherem und geringerem Gewicht als Wasser besondere Instrumente, manche haben einen noch engeren Meßbereich.

Fig. 54.

Die Skala gibt entweder direkt das spezifische Gewicht an, dann ist aber die Teilung ungleichmäßig. Oder man verwendet deshalb empirische gleichmäßige Teilungen, die bequemer herzustellen sind und genauere Schätzung der Unterteile zulassen. Die gebräuchlichste stammt von Beaumé. Für Flüssigkeiten schwerer als Wasser ist das Aräometer von Beaumé so geteilt, daß es in Wasser auf Null und in einer Lösung von 15 Teilen Kochsalz auf 85 Teile Wasser auf 15 zeigt. Die Zwischenteilung wird gleichmäßig gemacht und über 15 hinaus gleichmäßig fortgesetzt. Das Instrument für Flüssigkeiten leichter als Wasser zeigt, in einer Lösung von 10 Teilen Kochsalz auf 90 Teile Wasser schwimmend, auf Null, in Wasser anf 10, die Skala ist dann noch oben gleichmäßig fortgesetzt. Man liest „Grade Beaumé“ ab, und bestimmt daraus das

spezifische Gewicht mit Hilfe von Tabellen, die ein für allemal genau berechnet sind.

Jedes Aräometer ist richtig bei einer bestimmten darauf angegebenen Temperatur, meist 15° C. Man darf es nur bei dieser benutzen, denn da sowohl das Instrument als auch die Flüssigkeit sich mit der Temperatur ausdehnt, so ist eine einfache Korrektion für Ablesungen bei anderer Temperatur untunlich, man müßte es besonders dafür eichen. Ein Aräometer mit der Bezeichnung „richtig bei 25° C" darf also, in Wasser von 25° C nicht die Dichte 1, das spezifische Gewicht 1000 $\frac{kg}{cbm}$ anzeigen, es muß sich, nach Fig. 53, auf $\gamma = 997 \frac{kg}{cbm}$ einstellen. Wollte man es aber in Wasser von 4° bringen, so würde es auch hier nicht 1000 $\frac{kg}{cbm}$ zeigen, denn nun hätte sich das Aräometer selbst im Inhalt verkleinert und zeigt daher das spezifische Gewicht zu gering an.

Die Hauptanwendung der Aräometer ist die Bestimmung der Zusammensetzung von Lösungen, etwa des Wassergehalts von Alkohol, des Salzgehalts einer Kochsalzlösung — wozu dann wieder Umrechnungstabellen passenden Orts zu finden sind.

Viel genauer findet man das spezifische Gewicht einer Flüssigkeit, indem man mittels einer feinen Wage den Gewichtsverlust feststellt, den ein Senkkörper, oft aus Glas bestehend, in der Flüssigkeit erfährt und ihn mit dem entsprechenden Gewichtsverlust in Wasser von gleicher Temperatur vergleicht. Bei anderer Temperatur hätte der Senkkörper nicht das gleiche Volumen. Wieviel leichter dieses Wasser dann ist als Wasser von 4°, das weiß man (Fig. 53), und man kann das spezifische Gewicht berechnen. Am besten bringt man ein Thermometer direkt im Senkkörper an.

68. **Spezifisches Gewicht von Gasen; Schilling-Bunsenscher Apparat; Luxsche Gaswage.** Auch bei Gasen ist die Bestimmung des spezifischen Gewichts meist nicht Selbstzweck, man will vielmehr aus dem spezifischen Gewicht etwa auf den CO_2-Gehalt der Rauchgase, auf den Heizwert von Leuchtgas schließen, weil diese ungefähr aus dem spezifischen Gewicht bestimmbar sind.

Oft gibt man das spezifische Gewicht, korrekter gesagt, die Dichte der Gase bezogen auf trockene Luft = 1 an. Trockene Luft wiegt bei 0° und 760 mm B Std. 1,293 $\frac{kg}{cbm}$. Ein Gas von der Dichte 0,9 wiegt also $1{,}293 \cdot 0{,}9 \frac{kg}{cbm}$. Die Bezugnahme auf Luft hat den Vorteil, daß die Angabe unabhängig ist von Druck und Temperatur, weil ja alle Gase nach dem gleichen Gesetz, dem Mariotte-Gay Lussacschen, von Druck und Temperatur beeinflußt werden. Da Dämpfe nicht dem gleichen Gesetz

folgen, so hat bei ihnen die Bezugnahme auf Luft keinen Vorteil, man muß trotzdem Druck und Temperatur beachten.

Im Apparat von Schilling (Fig. 55) findet man das spezifische Gewicht eines Gases auf folgende Weise. Der Apparat ist mit Wasser gefüllt, er besteht aus Glas mit Metallfassungen. Das innere Rohr kann man heben und senken, man kann also unter Benutzung der Hähne c und d abwechselnd durch c hindurch Gas ansaugen und durch d ausstoßen, bis die an c angeschlossene Gasleitung voll Gas, frei von Luft ist. Dann füllt man das innere Gefäß mit Gas und schließt beide Hähne. Öffnet man nun Hahn d so, daß das Gas, unter dem Druck der Wassersäule durch ein feines Loch ausströmt, welches sich in einem oberhalb d eingelegten Platinblech befindet, so kann man mittels einer Arretieruhr die Zeit feststellen, welche zwischen dem Durchgang des Wasserspiegels durch die beiden Marken a und b verfließt. Ein zweites Mal füllt man den Apparat mit Luft, läßt diese ausströmen und beobachtet wieder die Zeit zwischen dem Passieren der beiden Marken. Die beiden spezifischen Gewichte verhalten sich dann wie die Quadrate der Ausströmungszeiten. Das folgt daraus, daß ja bei beiden Versuchen während der Beobachtungszeit die gleiche Arbeit durch Ausgleichen der Wasserspiegel frei wird, daher muß auch die dem Gase erteilte kinetische Energie $\frac{1}{2} m w^2$ beide Male den gleichen Wert haben. Es ist also $\frac{1}{2} m_1 w_1^2 = \frac{1}{2} m_2 w_2^2$ oder $\frac{m_1}{m_2} = \frac{w_2^2}{w_1^2}$. Die beschleunigten Massen m sind den spezifischen Gewichten γ der Gase direkt, die Geschwindigkeiten w den Beobachtungszeiten t umgekehrt proportional, also ist $\frac{\gamma_1}{\gamma_2} = \frac{t_1^2}{t_2^2}$.

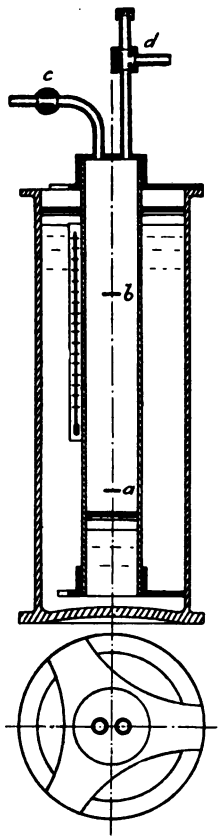


Fig. 55.
Schillings Apparat zur Bestimmung des spezifischen Gewichtes von Gasen.

Der Apparat ist ursprünglich von Bunsen für Quecksilberfüllung angegeben. Durch Temperaturänderungen ändern sich alle Verhältnisse am Apparat, man muß also beide Versuche bei der gleichen Temperatur vornehmen. Auch ist es nicht zulässig, den Versuch mit Luft ein für alle Mal zu machen, man muß beide Versuche kurz hintereinander machen, da das kleine Loch sich leicht etwas verändert. Man staube es vor den Versuchen ab.

Die Luxsche Gaswage (Fig. 56) läßt das spezifische Gewicht ohne Versuch direkt ablesen. Das Gas durchströmt den Ballon A, durch b ein-,

durch c austretend. Der Ballon ist als Teil einer Neigungswage auf Schneiden gelagert, je nach dem spezifischen Gewicht seines Inhaltes hebt oder senkt er sich. Die freie Beweglichkeit ist durch Zuführung des Gases durch Quecksilbernäpfe Q hindurch erreicht. Das bewirkt einen Ausschlag des Zeigers Z, die Skala gibt direkt das spezifische Gewicht bezogen auf die umgebende Luft. Werden die Neigungen zu groß, so kann man sich noch des Reiters R bedienen, den man je nach Bedarf in verschiedene Kerbe des Wagebalkens einhängt. Man hat dann die Reiterablesung und die Zeigerablesung zusammenzuzählen, um das spezifische Gewicht des durchströmenden Gases zu erhalten. Läßt man einfach Luft durch den Apparat gehen, so muß, wenn der Reiter auf 1,0 steht, der Zeiger auf 0 weisen: $1{,}0 + 0 = 1{,}0$, das ist ja das spezifische Gewicht der Luft bezogen auf sich selbst. Setzen wir nun den Reiter auf 0,8, so muß der Zeiger + 0,2 angeben: $0{,}8 + 0{,}2 = 1{,}0$. Zeigt das Instrument nicht so, so muß man die Wage mit den Gewichten G_1 und G_2 justieren. Manometer M und Thermometer T lassen Druck und Temperatur des strömenden Gases erkennen. Die Gaswage muß natürlich wagerecht stehen, außerdem so lange vor ihrer Benutzung aufgestellt sein, daß sie die Temperatur der Umgebung hat.

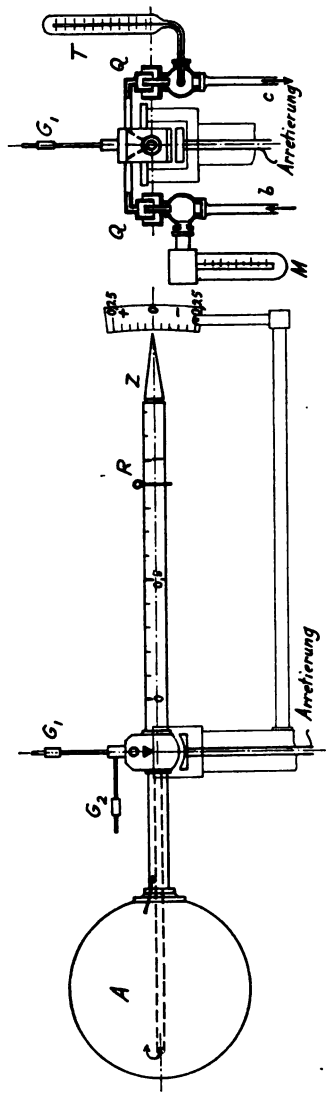


Fig. 56. Luxsche Gaswage.

69. **Einfluß der Feuchtigkeit.** Zu beachten ist bei beiden besprochenen und allen anderen Apparaten, daß sie das spezifische Gewicht des Gases bezogen auf Luft = 1 angeben, aber bezogen auf feuchte Luft; beim Schillingschen Apparat wird die Luft, die man zum Vergleich ausströmen läßt, mit Feuchtigkeit gesättigt sein, die Gaswage vergleicht mit der umgebenden Außenluft, deren Feuchtigkeit man mittels Hygrometers (§ 205) bestimmen kann. Wie man bei genaueren Messungen die Umrechnung auf trockene Luft zu machen hat, das wird man mit Hilfe der Beispiele des § 65 finden können. Man findet Beispiele in

Slaby, Kalorimetrische Untersuchungen über den Kreisprozeß der Gasmaschine, Seite 11.

70. **Wagen; Übersicht.** Zu Gewichtsbestimmungen dient die Wage. Mit ihrer Hilfe sind Mengenbestimmungen selbst bei mäßiger Sorgfalt noch mit einem Grade von Genauigkeit auszuführen, der die Bedürfnisse von Maschinenuntersuchungen bei weitem übertrifft. Da ferner die Gewichtsmessung von der Temperatur unabhängig ist, die Volumenmessung aber ihre Beachtung verlangt, was nicht immer leicht zu machen ist — so können wir geradezu die Regel aussprechen, man solle wägen, wo immer es tunlich ist.

Von den zahlreichen Typen der Wage kommt für unsere Zwecke die Brückenwage fast allein in Betracht. Für die seltenen Fälle, wo man eine feinere Balkenwage verwendet — um etwa bei Heizwertbestimmungen, Kap. XIII, die Kohlebriketts zu wägen — kann man sich erforderlichenfalls in Physikwerken Rat holen. Die Federwage dient uns nur als Dynamometer. Für Mengenbestimmungen ist sie wenig genau.

71. **Auftrieb der Luft.** Der Fehler, welcher durch Vernachlässigung des Auftriebes der Luft bei Wägungen entsteht, ist technisch meist belanglos.

Jeder Körper wird von der Erde verschieden stark angezogen, sein Gewicht ist also bei übrigens gleichen Umständen verschieden, je nachdem er sich im lufterfüllten oder im luftleeren Raum befindet. Im lufterfüllten ist er nach dem archimedischen Prinzip um so viel leichter, wie das verdrängte Luftvolumen wiegt. Die Stoffmenge ist nun offenbar durch das Gewicht im luftleeren Raum gegeben, denn sonst wäre die Angabe von dem momentanen Barometerstand und von der Temperatur abhängig. Und in der Tat sind alle Angaben über spezifische Wärmen, spezifische Gewichte und dergleichen so zu verstehen, daß sie sich auf ein Kilogramm im luftleeren Raum beziehen. Insbesondere bei Gasen ist eine andere Angabe ja geradezu widersinnig. Auch die Gewichtsstücke sollen so geeicht sein, daß sie im luftleeren Raum richtig sind.

Der Fehler, den man durch Nichtbeachteu dieser Verhältnisse macht, ist um so größer, je geringer das spezifische Gewicht des betreffenden Körpers ist, je mehr Luft er also verdrängt. Ein Kubikmeter Wasser wiegt 1000 kg, die von ihm verdrängte Luft 1,3 kg bei 0°, oder nur 1,2 kg bei 20°. Man begeht nur Fehler von 0,13 oder 0,12 %, wenn man nicht auf den luftleeren Raum reduziert.

Dieser Fehler wird noch vermindert dadurch, daß ja auch die benutzten Gewichte einen Auftrieb erfahren; er beschränkt sich auf den Unterschied der Volumina von gewogenem Körper und Gewichten. Bei Brückenwagen indessen, um die es sich für uns meist handelt, ist das Volumen der Gewichte sehr klein.

72. **Brückenwagen.** Brückenwagen sind in Fig. 57 bis 59 schematisch dargestellt, eine große Zahl anderer Formen wird ausgeführt. Die Last steht

auf der sogenannten Brücke B, welche auf Hebeln ruht. Die Hebel werden zum Einspielen gebracht, d. h. in ihre Mittelstellung zurückgezogen, entweder indem man Gewichte auf eine Gewichtsschale setzt oder indem man ein Laufgewicht auf einem Hebel mit Skala verschiebt, beide Anordnungen sind

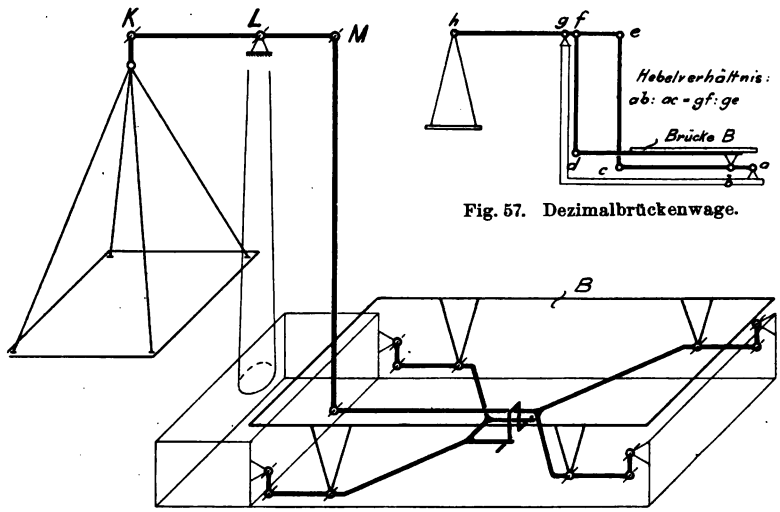


Fig. 57. Dezimalbrückenwage.

Fig. 58. Dezimalbrückenwage.

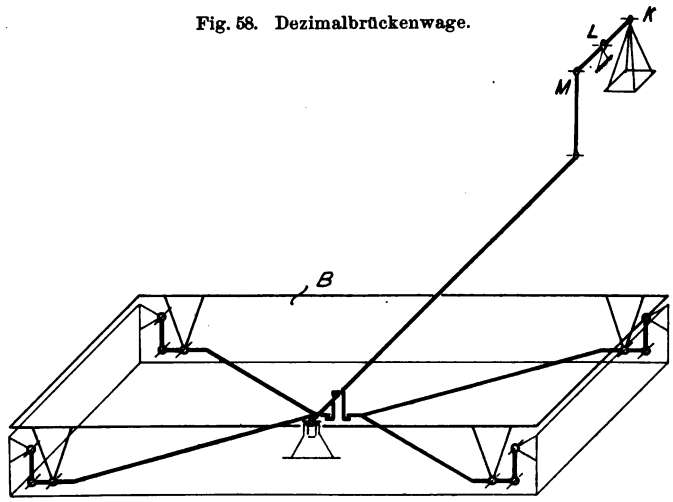


Fig. 59. Zentesimalwage.

gebräuchlich, die Messung durch Laufgewicht ist viel bequemer und meist genügend genau. Aus der Menge der aufgesetzten Gewichte, aus der Stellung des Laufgewichtes erkennt man die zu messende Last. Wo man mit Gewichtsstücken aus gleicht, sind die Hebelverhältnisse so gewählt,

daß die Gewichtsstücke entweder $^1/_{10}$ oder aber bei großen stationären Wagen $^1/_{100}$ der Last betragen: Dezimal- und Zentesimalwage. Laufgewichtswagen haben eine bedeutende Übersetzung in den Hebeln, um das Laufgewicht möglichst klein zu machen.

Die Hebelanordnung muß so sein, daß beim Hin- und Herspielen der Hebel die Brücke stets sich selbst parallel bleibt, so daß die Last sich um gleich viel hebt und senkt, sie stehe an welcher Stelle der Brücke sie wolle. Dann folgt aus dem Gesetz der virtuellen Verrückungen, daß es beim Wägen gleichgültig für das Ergebnis ist, wo auf der Brücke die Last steht — und das muß natürlich gleichgültig sein. Die in den Figuren gegebenen Anordnungen erfüllen diese Bedingung; Fig. 57 nur, wenn die dazu gesetzten Hebelverhältnisse innegehalten werden. Außer der Forderung der Parallelführung hat der Konstrukteur einer Wage eine Reihe von Bedingungen zu erfüllen, welche für das richtige Arbeiten der Wage maßgebend sind. Last und Gewichte sollen sich nämlich im stabilen Gleichgewicht miteinander befinden, so daß die Wage, durch Anstoßen aus ihrer Mittellage gebracht, stets wieder von selbst in dieselbe zurückkehrt; die Empfindlichkeit der Wage soll möglichst groß sein; und das alles soll nicht nur bei einer, sondern bei jeder Last der Fall sein. Man erreicht es durch die bekannte Bedingung, daß bei den Hebeln die drei Schneiden in einer Geraden liegen müssen, ferner durch Geringhalten der beweglichen Massen von Hebel und Brücke, die man wohl als tote Last bezeichnet, endlich durch passende Verteilung dieser Massen. Die als Achsen gezeichneten Lagerungen sind sämtlich Schneidenlager.

73. **Entlastung; Wägemaschinen.** Bessere Brückenwagen haben eine Entlastung. Hebt man den Wägearm KL, so daß M sich senkt, so senkt sich auch die Brücke und kann sich auf zu dem Zwecke vorhandene Auflager stützen. Alle Schneiden werden dadurch entlastet. Man soll nur in entlastetem Zustand der Wage Lasten auf die Brücke bringen, um die Schneiden zu schonen. Ein nur einmaliger Verstoß hiergegen mindert die Empfindlichkeit einer Wage sehr.

Um die Wage dann in Wiegezustand zu bringen, ist offenbar ein Anheben der ganzen Last erforderlich, wenn auch nur um wenige Millimeter. Bei großen Lasten bedingt das eine von Hand oder mechanisch betätigte Windevorrichtung. Solche und manche andere mechanische Einrichtung, beispielsweise selbsttätige Registriervorrichtungen für alle über eine Wage gegangenen Lasten, machen moderne Wagen zu recht komplizierten Apparaten, für welche die übliche Bezeichnung „Wägemaschine“ wohl zutrifft.

74. **Eichung.** Da die Wagen vielfach dem öffentlichen Verkehr dienen, so wird ihre Herstellung und Instandhaltung vom Staate insofern überwacht, als nur amtlich geeichte Wagen öffentlich benutzt werden dürfen, und die Eichung alle drei Jahre wiederholt werden muß. Daher sind die käuflichen Wagen im allgemeinen recht verläßlich, auch wenn das einzelne

Exemplar nicht geeicht ist. Geeichte Wagen haben den Stempel eines Eichamts.

Dieser Eichstempel wird für Brückenwagen erteilt, sobald ihr Fehler bei Höchstlast nicht größer als 0,6 g auf jedes Kilogramm Last ist. Bei $^1/_{10}$ der Höchstlast darf die Wage einen Fehler gleich dem fünften Teil des bei Höchstlast zulässigen Fehlers haben, der Fehler darf dann also 1,2 g pro Kilogramm Last ausmachen.

Eine Brückenwage, gleichgültig ob Dezimal-, Zentesimal- oder Laufgewichtswage, von etwa 1000 kg Wiegefähigkeit wird geeicht, indem man zunächst die Zungen leer zum Einspielen bringt. Man bringt 100 kg, dann 1000 kg auf die Brücke, entlastet wieder auf 100 kg, um zu sehen, ob die Wage sich bei der Höchstlast nicht verändert hat, und entlastet wieder ganz. Ihr Fehler darf 600 g bei Höchstlast und $\frac{1}{5} \cdot 600 = 120$ g bei kleiner Last sein. Bei jeder der Belastungen von 100, 1000 und wieder 100 kg hat man die Genauigkeit und die Empfindlichkeit der Wage zu prüfen: beide müssen sich innerhalb der genannten Fehlergrenze halten. Sollte also eine Dezimalwage nicht ganz einspielen, wenn man der Höchstlast von 1000 kg 100 kg Gewichte auf der Gewichtsschale entgegensetzt, so muß man sie doch zum Einspielen bringen können, indem man höchstens 600 g von der Brücke wegnimmt oder hinzufügt: dann ist die Genauigkeit ausreichend. Und hat man die Wage bei der Höchstlast zum genauen Einspielen gebracht, so muß sie durch Aufsetzen von 600 g auf die Brücke nicht nur aus der Gleichgewichtslage kommen, sondern auch in einer von der Mittelstellung „deutlich" abweichenden Stellung zur Ruhe kommen: dann ist die Empfindlichkeit ausreichend.

Wageneichungen werden von den Königlichen Eichämtern (in Preußen) nach diesen Vorschriften und für andere Wagenformen nach anderen, in der Eichordnung für das Deutsche Reich enthaltenen Bestimmungen geeicht. Die Gebühren sind so mäßig, daß man meist besser daran tun wird, sie amtlich eichen zu lassen, als dies selbst zu besorgen (3 M. für die ersten 2000 kg, 1 M. für jede weitere 1000 kg Wiegefähigkeit der Wage; dazu Diäten für den Eichmeister, wenn die Eichung nicht im Eichamt geschieht.) Will man eine Wage eichen, ohne soviel Gewichte zu haben, wie die Höchstlast beträgt, so muß man mit einer kleinen, natürlich zuverlässigen Hilfswage Eisenteile oder dergleichen in kleinen Portionen zuwiegen.

Die Eichung der Gewichte ist so wichtig wie die der Wage; durch Schmutz, Rost und Abspringen von Ecken können Gewichte falsch werden. Wir verweisen auf die anderen Orts gemachte Bemerkung, daß gerade bei den einfachsten Messungen, nämlich Längen- und Gewichtsmessungen, am meisten gesündigt wird durch prüfungslose Verwendung schlechter Meßwerkzeuge.

75. **Wägen von Flüssigkeiten; Brutto; Netto; Tara; Praktisches.** Flüssigkeiten und manches andere kann man nur unter Benutzung eines

auf der Wage stehenden Behälters wiegen. Man nennt das Gewicht des Behälters die Tara, das Gewicht von Flüssigkeit einschließlich Behälter heißt Brutto- und das Gewicht der Flüssigkeit allein Nettogewicht. Das Nettogewicht will man ermitteln und findet es als Differenz Brutto minus Tara. Das Ausgleichen des Taragewichts heißt Austarieren.

Die Tara soll möglichst klein sein, sonst wird das Wägen zu einer Differenzmethode und die Messung ungenau (§ 13). Das Eigengewicht der Brücke bildet schon gewissermaßen einen Teil der Tara, und da es bei kleiner Belastung relativ mehr ausmacht als bei Höchstlast, so mißt die Wage ohnehin bei der Höchstlast am besten. In den Bestimmungen über Wageneichungen (§ 74) sahen wir dem Rechnung getragen.

Man soll also sowohl die Wage als auch den Behälter nicht größer nehmen als nötig.

76. **Kalibrierte Gefäße.** Flüssigkeiten mißt man oft durch Einfüllen in kalibrierte Gefäße. Entweder hat das Gefäß eine Skala, an der man jede beliebige Flüssigkeitsmenge ablesen kann (Mensuren), oder es hat eine Marke (Eichstrich), bis zu dem hin es eine gewisse Menge Flüssigkeit enthält, die man durch Versuch feststellt, und die keine runde Zahl zu sein braucht. — Um den Einfluß kleiner Niveauunterschiede bei der Messung zu mindern, macht man wohl das Gefäß in der Gegend des Eichstrichs enger. Wo die Messung so geschieht, daß man das Gefäß zum Rande füllt, entsteht eine Unsicherheit durch die Ausbildung einer Kuppe (Meniscus), die verschieden hoch sein kann.

Die Messung ist unter allen Umständen abhängig von der Temperatur; da sowohl Flüssigkeit als Gefäß sich ausdehnen, so kann man den Einfluß der Temperatur nur durch Versuch finden. Die Kalibrierung muß also bei einer Reihe von Temperaturen oder doch bei der Verwendungstemperatur stattfinden.

Die Kalibrierung geschieht meist, indem man das Gefäß zur Marke auffüllt und die Wassermenge wägt. Will man nun eine Kalibrierung nach Volumen vornehmen, so muß man, mindestens bei warmem Wasser, die Ausdehnung des Wassers durch die Wärme berücksichtigen. Man habe etwa ein Gefäß bei 60° C zu kalibrieren und findet durch Wägung, daß es 734 kg Wasser faßt; dann ist sein Inhalt nach Fig. 53, § 64, $\frac{734}{0{,}983} = 746$ l. Man kann das Gefäß also mit der Aufschrift versehen: „0,746 cbm bei 60°“ oder auch „734 kg Wasser bei 60°“; falsch aber wäre die Aufschrift „0,734 cbm“.

Benutzt man zum Kalibrieren nicht die Wage, sondern ein kleineres Hilfsgefäß, das man ins große ausleert, so hat man dieses seinerseits durch Wägen zu eichen, und kann es wieder entweder nach Gewicht oder nach Volumen eichen.

77. **Dauernd fließende Flüssigkeiten; Übersicht der Methoden.** Bisher handelte es sich um die Messung einer bestimmten vor-

handenen Flüssigkeitsmenge — denn feste Körper kommen für uns selten in Frage. Ganz anders wird die Messung fortlaufend fließender Wassermengen bewirkt. Der Dampfkessel muß kontinuierlich oder doch in regelmäßigen Intervallen gespeist werden, der Turbine läuft kontinuierlich Wasser zu, aus der arbeitenden Dampfmaschine läuft kontinuierlich das Arbeitsdampfkondensat und das Kühlwasser ab. In solchen Fällen ist die Messung der in der Zeiteinheit durchlaufenden Wassermenge nötig, die zu messende Größe hat also die Benennung $\frac{\text{cbm}}{\text{sec}}$, $\frac{\text{cbm}}{\text{Std.}}$, $\frac{\text{kg}}{\text{sec}}$ oder dergleichen. Die Wassermenge pro Zeiteinheit nennt man wohl den Wasserfluß.

Für kleine Wassermengen kann man auch hier noch Wage oder kalibrierte Gefäße benutzen, unter gleichzeitiger Messung der Zeit. Für größere Wassermengen würden solche Meßeinrichtungen zu schwerfällig und teuer, man verwendet dann Ausflußöffnungen mit Messung der Standhöhe, und für die größesten Wassermengen muß man zu Wehrmessungen oder zur Benutzung des Woltmannschen Flügels greifen, obwohl beide Methoden nur bei Anwendung großer Sorgfalt und guter Meßeinrichtungen befriedigende Resultate geben. Wo die zu messende Wassermenge in einer Rohrleitung fließt, kann man sie durch Beobachten des Spannungsverlustes messen oder auch mit Hilfe eines Wassermessers.

78. **Wägen; Ausmessen.** Um durch Wägen eine dauernd fließende Wassermenge zu messen, bedarf man zweier Gefäße von gleichem oder verschiedenem Inhalt, die auf Wagen stehen, und in die man das Wasser abwechselnd leitet; das Ende der zuführenden Rohrleitung ist dazu beweglich drehbar eingerichtet, um das eine oder das andere Gefäß zu füllen. Unten an den Gefäßen ist ein Ventil oder Hahn angebracht, durch den man das Wasser nach erfolgter Wägung abläßt. Je schneller das Wasser abläuft, für desto größere Wassermengen reicht die Einrichtung, man mache also die Ausflußöffnung groß. Ist sie ungenügend, so schafft ein angesetztes Rohrstück, saugend wirkend, Besserung. Ein Gefäß nach Fig. 60 ist zweckmäßig, der Verschlußhebel federt und sorgt daher für dichten Abschluß des Ventils.

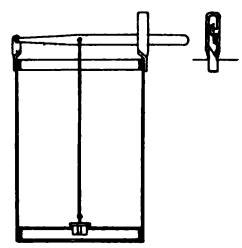


Fig. 60.

Hat man ein großes und ein kleines Gefäß zur Verfügung und zwei entsprechende Wagen, so benützt man das große zum Messen, und das kleine fängt das Wasser nur so lange auf, wie man Zeit zum Wägen des großen gebraucht. Es ist auch ausreichend, nur das große Gefäß auf einer Wage zu haben, das kleine Hilfsgefäß steht höher und kann nach Bedarf ins Hauptgefäß entleert werden (Fig. 61). Während der Wägung des großen fängt man das Wasser im Hilfsgefäß auf; nach Entleerung des Hauptgefäßes läßt man den Inhalt des Hilfsgefäßes ins Hauptgefäß und verwiegt

ihn mit dem nächsten Quantum. Die umgekehrte Einrichtung findet man für Kesselspeisung verwendet: von zwei Gefäßen steht das obere auf der Wage, man läßt die abgewogene Wassermenge in den unteren Vorratsbehälter, aus dem die Speisepumpe nach Bedarf entnehmen kann. Im Vorratsbehälter muß das Wasser am Anfang und am Ende des ganzen Versuches gleich hoch stehen (Wasserstandsglas).

Die Einrichtung Fig. 61 ist brauchbar, wenn das Wasser nach, die andere, wenn es vor der Benutzung gemessen wird.

Hat man nur ein Gefäß zur Verfügung, so hilft man sich, indem man mittels Arretieruhr die Zeit zum Auffüllen eines bestimmten Gewichtes Wasser feststellt.

Ganz ebenso kann man die Volumenmessung mit Hilfe zweier Gefäße von gleichem oder verschiedenem Inhalt vornehmen; im Notfall braucht auch hier nur eines kalibriert zu sein. Da das Auffüllen bis an eine Marke unbequem ist, so ist ein geteiltes Gefäß nach Fig. 62 zweckmäßig: eine der beiden Hälften füllt sich bis an die niedrigere Scheidewand an,

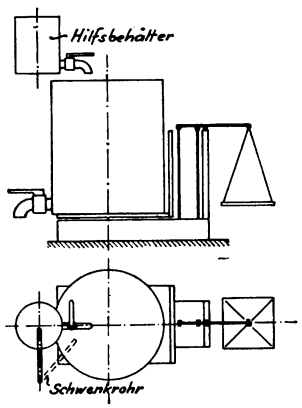


Fig. 61.

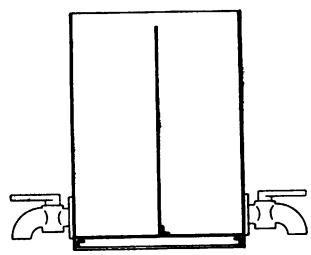


Fig. 62.

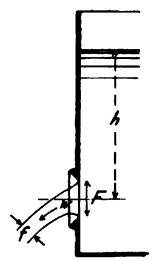


Fig. 63.

dann läuft der Überschuß in die andere leere Hälfte. Man schwenkt nun das Zuflußrohr herum und entleert die erste Hälfte durch den Hahn. Ist die zweite Hälfte voll, so läuft das Wasser von selbst in die erste. Jede der Hälften ist kalibriert.

Bei Benutzung kalibrierter Gefäße ist es oft lästig, daß man nicht jede beliebige Menge messen kann, sondern nur Vielfache der Gefäßinhalte.

79. **Ausflußöffnungen.** Ist in der Wand eines Gefäßes, Fig. 63, eine Öffnung vorhanden, so tritt Wasser aus mit einer Geschwindigkeit w', die von der Standhöhe h des Wassers über der Öffnung abhängt, und zwar nach der Beziehung $w' = \sqrt{2\,g\,h}$; hierin ist $g = 9{,}81\ \frac{\text{m}}{\text{sec}}$ die Schwerebeschleunigung. Hat die Ausflußöffnung einen Querschnitt F, so sollte das austretende Wasservolumen $V' = F \cdot \sqrt{2\,g\,h}$ sein. Kennt man also den Mündungsquerschnitt F, so kann man aus der Standhöhe des Wassers auf die ausfließende Wassermenge

schließen. Fließt von oben eine zu messende Wassermenge zu, so wird der Wasserspiegel so lange steigen, bis zu- und abfließende Wassermenge einander gleich sind: dann stellt er sich konstant ein, und man kann ablesen.

Man sieht sofort, daß diese Meßmethode nur da brauchbar ist, wo das Wasser ganz oder annähernd gleichmäßig fließt.

80. **Kontraktions-, Ausfluß-, Geschwindigkeitskoeffizient.** Das durch eine Mündung austretende Wasservolumen sollte also $V' = F\sqrt{2gh}$ sein. In Wahrheit ist es kleiner, etwa V. Dann bezeichnet man das Verhältnis $\frac{V}{V'} = \mu$ als Ausflußkoeffizienten. Über die Größe von μ sprechen wir sogleich; kennt man μ, so ist die wirklich ausfließende Wassermenge $V = \mu \cdot F\sqrt{2gh}$.

Der Grund dafür, daß weniger Wasser austritt als theoretisch zu erwarten wäre, ist ein doppelter: einerseits wird die Ausflußgeschwindigkeit $w' = \sqrt{2gh}$ infolge von Widerständen etwas verkleinert und in Wirklichkeit nur $w = \zeta \cdot w'$; dieser Koeffizient $\zeta = \frac{w}{w'}$ heißt Geschwindigkeitskoeffizient; andererseits ist der Querschnitt f des austretenden Wasserstrahls kleiner als der Mündungsquerschnitt F, man bezeichnet diese Erscheinung als Kontraktion des Wasserstrahls, und das Verhältnis $\frac{f}{F} = \varphi$ nennt man den Kontraktionskoeffizienten. — Für scharfkantige Mündungen ist der Kontraktionskoeffizient $\varphi = 0{,}63$, der Geschwindigkeitskoeffizient $\zeta = 0{,}98$, also der Ausflußkoeffizient $\mu = \varphi \cdot \zeta = 0{,}615$. Von den drei genannten Koeffizienten braucht man bei Wassermessungen nur den Ausflußkoeffizienten, wir führten die anderen beiden an, um Verwechselungen zu vermeiden. Man bestimmt den Ausflußkoeffizienten experimentell, indem man das aus der Mündung fließende Wasser auffängt und wägt (Eichung der Mündung). Solche Messungen sind namentlich von Weisbach an Mündungen verschiedenster Formen vorgenommen.

81. **Scharfe und abgerundete Mündungen.** Für Wassermessungen verwendet man aus Herstellungsrücksichten Öffnungen von kreisrundem Querschnitt. Im Längsschnitt sind dieselben entweder scharfkantig nach Fig. 64a oder abgerundet, etwa nach Fig. 64b. Man wird sich natürlich die Messung nicht erschweren durch Wahl irgendwie komplizierterer Formen. Für scharfkantige Öffnungen ist $\mu \sim 0{,}615$, für abgerundete findet keine Kontraktion statt, daher wird $\mu = \zeta = 0{,}98$ und bei sehr guter Politur der Mündung $\mu = 0{,}995$.

Die abgerundete Mündung ist viel zweckmäßiger als die scharfe. Bei der scharfkantigen verändert sich der Ausflußkoeffizient, sobald die Kante nicht ganz scharf ist; die scharfe Kante wird leicht verletzt, z. B. schon

beim Messen des Durchmessers. Die abgerundete ist Verletzungen weniger ausgesetzt. Vor allen Dingen spricht aber folgendes für Verwendung abgerundeter Mündungen: Nicht selten hat man warmes oder unreines Wasser zu messen oder auch andere Flüssigkeiten als Wasser, etwa die Sole in Kälteanlagen, die mehr oder weniger konzentriert sein kann. Man ist selten in der Lage, eine Eichung der Öffnung mit warmem Wasser oder mit Sole vorzunehmen, man überträgt einfach die mit kaltem Wasser gefundenen Werte von μ auf die anderen Verhältnisse. Bei scharfer Öffnung findet Kontraktion statt, und es ist wohl möglich, daß diese unter anderen Verhältnissen in ganz anderem Betrage stattfindet; bei abgerundeter Mündung findet für kaltes Wasser keine Kontraktion statt, weshalb sollte sie bei anderen Flüssigkeiten plötzlich auftreten? Die Reibung aber kann offenbar nur unbedeutende Schwankungen im Werte von μ veranlassen. Veränderte Bedingungen werden um so weniger Einfluß auf den Wert von μ haben, je weniger μ selbst von der Einheit abweicht. — Versuche liegen meines Wissens über diese Frage nicht vor.

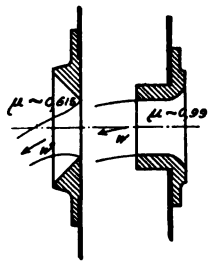


Fig. 64a und b.

82. **Praktisches.** Die Standhöhe h des Wassers über der Mündung hat man bei seitlichem Ausfluß bis Mitte Öffnung zu messen (Fig. 63), bei Ausfluß durch den Boden bis zu der Höhe, wo der Wasserstrahl sich vom Gefäß löst (Fig. 65). Die Standhöhe soll mindestens so groß sein, daß die Wasseroberfläche über dem ausfließenden Strahl nicht irgendwie gestört ist. Zu kleine Standhöhe verändert bei scharfer Mündung den Ausflußkoeffizienten μ.

Eine große Standhöhe ist aus doppeltem Grunde erwünscht: da bei Messung der Standhöhe immer die gleiche Ungenauigkeit gemacht wird, so ist die Ungenauigkeit bei größerer Standhöhe relativ kleiner. Außerdem aber ändert sich ja die Standhöhe mit dem Quadrat der Ausflußmenge: $V = \mu F \sqrt{2gh}$. Daher wird die Änderung der Standhöhe mit der Ausflußmenge um so bedeutender sein, je größer die Standhöhe selbst ist. — Daß die gesuchte Größe q vom Quadrat der beobachteten, h, abhängt, ist eine für die Messung besonders günstige Beziehung. Wollen wir bei einem längeren Versuch die Standhöhen regelmäßig ablesen, um daraus die mittlere sekundliche Wassermenge zu finden, so ist es nicht ganz korrekt, den Mittelwert aus den Standhöhen zu bilden und aus ihm die mittlere Wassermenge zu berechnen; denn die Wurzel aus dem Mittelwert ist nicht das gleiche wie der Mittelwert aus den Wurzeln. Wir müssen zu jeder einzelnen Standhöhe die zugehörige Wassermenge finden und aus diesen das Mittel bilden. Bleiben die Schwankungen des Wasserspiegels unter 10 % der Standhöhe,

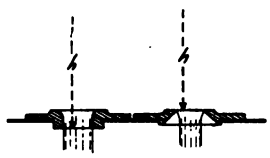


Fig. 65.

so ist der Unterschied zwischen beiden Rechnungsarten gering. Man vergleiche hierüber die Einleitung, § 9 und 10.

Bei großen Wassermengen benutzt man nicht eine große Mündung, diese wäre schwer zu eichen, sondern mehrere kleine. Die Gesamtausflußmenge ist die Summe der einzelnen Mengen. Die Öffnungen dürfen nicht zu dicht beieinander sein, sonst beeinflussen sie sich, und der Ausflußkoeffizient ändert sich, sie dürfen auch nicht dem Boden oder der Seitenwand des Ausflußbehälters zu nahe sein, sonst tritt das gleiche auf. Jede Mündung muß etwa das Zweifache des eigenen Durchmessers um sich herum frei für sich haben.

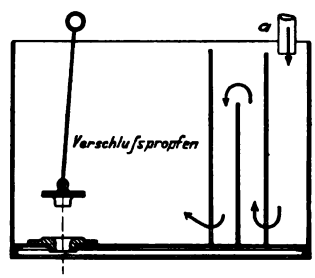


Fig. 66.

Die Mündungen werden wohl stets aus Bronze gefertigt. Man setzt sie dann an irgend eine passende Stelle, in Holz gefaßt, in den Wasserlauf ein, oder aber man verwendet Ausflußgefäße nach Fig. 66, welche eine Anzahl Öffnungen verschiedener Größe haben, die man nach Bedarf verschließt, so daß bei jeder Wassermenge die Standhöhe groß wird. Bei *a* läuft das Wasser zu, die Scheidewände beruhigen es, so daß über den Mündungen ein völlig glatter Spiegel steht. Die Standhöhe mißt man mit einem einfachen Maßstab, den man eintaucht und auf halbe oder zehntel Centimeter abliest. Man kann auch den bei den Wehrmessungen zu beschreibenden Hakenmesser verwenden (Fig. 70).

Wir wiederholen, daß man mittels der Ausflußöffnungen das durchgehende Volumen mißt, nicht das Gewicht.

83. **Brauersche Methode für wechselnden Wasserfluß.** Um auch bei wechselnder Wassermenge die bequemen Ausflußmündungen verwenden zu können, kann man sich folgender Methode von Brauer bedienen: Im Boden eines Gefäßes sind zwei Öffnungen, eine kleine und eine große. Die Ausflußmengen beider verhalten sich wie die Mündungsquerschnitte. Fängt man das aus der kleinen Mündung fließende Wasser auf und bringt es nach Beendigung des Versuchs zur Wägung, so kann man daraus das insgesamt durchgegangene Wassergewicht berechnen. Diese Methode bestimmt das Wassergewicht, nicht das Volumen. Der Vorteil der Methode ist, mit einer kleinen Wage große Wassermengen messen zu können.

84. **Wehrmessungen.** Wenn Wasser über ein Wehr hinwegfließt, wie Fig. 67 dies andeutet, so kann man, ähnlich wie bei Ausflußmündungen, aus der Standhöhe h des Wassers über der Wehrkante auf die überfließende Wassermenge schließen, und letztere messen, indem man die Höhe h beobachtet.

Einem Wasserteilchen, welches in der Tiefe x unter dem Oberwasserspiegel sich befindet, wird theoretisch eine Geschwindigkeit $w = \sqrt{2gx}$

erteilt. Mit dieser Geschwindigkeit fließt das Wasser in dem schmalen Streifen von der Höhe dx und der Länge b ab, wo b die Breite des Wehres, also die Länge der Wehrkante ist. Der Inhalt dieses Streifens ist $dF = b \cdot dx$ und das durch ihn sekundlich gehende Wasservolumen

$$dV = w \cdot dF = b \cdot dx \sqrt{2gx} .$$

Durch Integrieren zwischen den Grenzen $x = 0$ bis $x = h$ erhalten wir das theoretisch über das Wehr gehende Wasservolumen

$$V' = b\sqrt{2g}\int_0^h \sqrt{x}\,dx = b\sqrt{2g}\left[\tfrac{2}{3}x^{\frac{3}{2}}\right]_0^h ,$$

$$V' = \tfrac{2}{3} b \sqrt{2gh^3} .$$

Über jedes Meter der Wehrbreite sollte das Wasservolumen $V_1' = \frac{2}{3}\sqrt{2gh^3}$ fließen.

Wenn wir es als besonders günstig für die Messung mit Ausflußmündungen ansahen, daß die zu findende Wassermenge vom Quadrat der beobachteten Standhöhe abhing, so ist es hier umgekehrt: die Potenz, in der V auftritt, ist diesmal sogar niedriger als die von h, bei verschiedenen Wassermengen sind die abzulesenden Standhöhen also nur wenig voneinander verschieden. Außerdem wird man bei Wehrmessungen mit kleineren Standhöhen arbeiten müssen. Beides wirkt dahin, kleinen Fehlern im Ablesen der Standhöhe großen Einfluß zu geben; man muß die Standhöhe sehr genau ablesen, und wo das nicht genügend genau geschieht, erhält man große Unsicherheiten. Trotzdem kann man Wehrmessungen für Messung großer Wassermengen, in Turbinengerinnen und dergleichen, oft nicht entbehren.

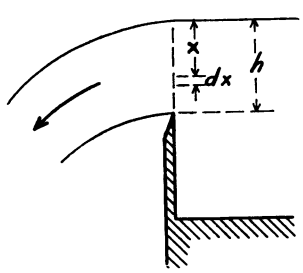


Fig. 67.

Wehrmessungen ergeben das Volumen des übergegangenen Wassers.

85. **Ausflußkoeffizient; Wehre mit und ohne Seitenkontraktion.** In Wahrheit ergeben experimentelle Bestimmungen der über ein Wehr gehenden Wassermenge eine gegenüber dem theoretischen Wert zu geringe Wasserlieferung. Es fließt nur etwa V über, statt der theoretischen $V' = \frac{2}{3} b \sqrt{2gh^3}$. Das Verhältnis beider nennt man, wie bei den Mündungen, den Ausflußkoeffizienten, $\mu = \frac{V}{V'}$.

Die Tatsache, daß zu wenig Wasser über ein Wehr geht, erklärt sich wie bei den Mündungen teils durch Geschwindigkeitsverluste infolge von Reibung, teils durch Kontraktionserscheinungen. Wie Fig. 68 erkennen

läßt, fängt der Wasserspiegel schon ein beträchtliches Stück vor dem Wehr an sich zu senken, so daß am Wehr die gemessene Tiefe h gar nicht mehr vorhanden ist. Auch von unten her kontrahiert sich der Strahl, wenn man dafür sorgt, daß unter ihn Luft treten kann, so daß er sich nicht am Wehr festsaugt; diese Ventilation des Wehres ist für Meßzwecke immer nötig. Kontraktion tritt auch seitlich auf, wenn die Wehrbreite kleiner ist als die Breite des Zulaufkanales (Grundriß Fig. 68a). Nimmt das Wehr die volle Breite des Zulaufkanales ein (Grundriß Fig. 68b), so tritt keine Seitenkontraktion auf.

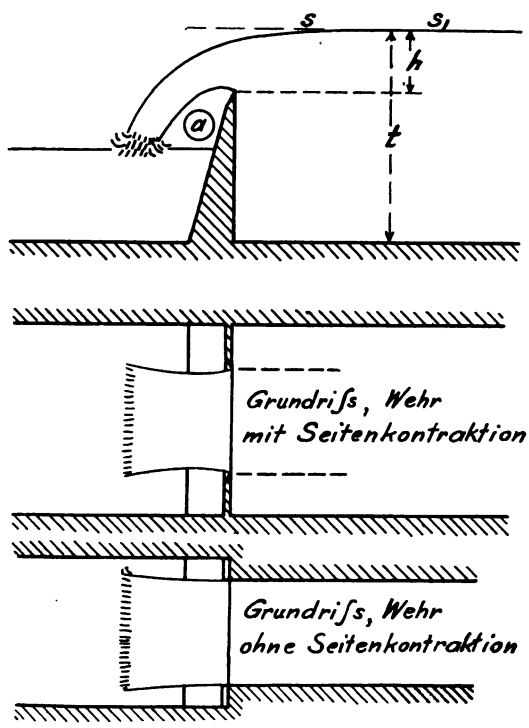


Fig. 68, 68a und b.

Die bei einer bestimmten abgelesenen Standhöhe h über das Wehr gehende Wassermenge und damit der Ausflußkoeffizient μ hängt von einer großen Reihe von Umständen ab. Zunächst spielt es eine große Rolle, wo man die Ablesung von h bewerkstelligt, ob dicht hinter dem Wehr bei s, ob weiter ab bei s_1, Fig. 68. Die erwähnte Senkung des Wasserspiegels läßt μ größer erscheinen, wenn man bei s mißt. Verschiedene Werte von μ ergeben sich auch, je nachdem man keine Seitenkontraktion hat, oder ob diese einerseits oder beiderseits auftritt. μ ist auch von der Tiefe t des Zuflußgrabens abhängig, oder, genauer gesagt, von dem Verhältnis $\frac{t}{h}$; denn in einem flachen Zuflußgraben läuft das Wasser schnell, schon bevor es an das Wehr kommt und wird daher am Wehr eine größere Endgeschwindigkeit annehmen als wenn es durch einen tiefen Graben zugeflossen wäre. Bei schmalem Wehr und schmalem Zuflußgraben wird auch der Umstand von merklichem Einfluß sein, daß an den Seitenwänden die Wasserbewegung durch Reibung gehindert ist; μ wird also mit zunehmender Wehrbreite etwas steigen.

Diese und andere Umstände, die auf das Ergebnis Einfluß haben, erklären es, daß die Angaben verschiedener Experimentatoren über den Wert von μ ziemlich voneinander abweichen. Die Ergebnisse der Versuche von Castel, Poncelet, Lesbros, Francis und Fteley-Stearns sind von Frese zusammen mit eigenen Versuchen in der Z. V. d. I. 1890 kritisch verarbeitet. Neuere Versuche von Hansen, Z. V. d. I. 1892, schließen sich den Freseschen Ergebnissen gut an.

86. **Werte von Ausflußkoeffizienten.** Frese gibt für Überfälle ohne Seitenkontraktion den Wert $\mu_0 = 0{,}615 + \frac{0{,}0021}{h}$, worin h die Standhöhe des Oberwasserspiegels über der Wehrkante in Metern bedeutet, ge-

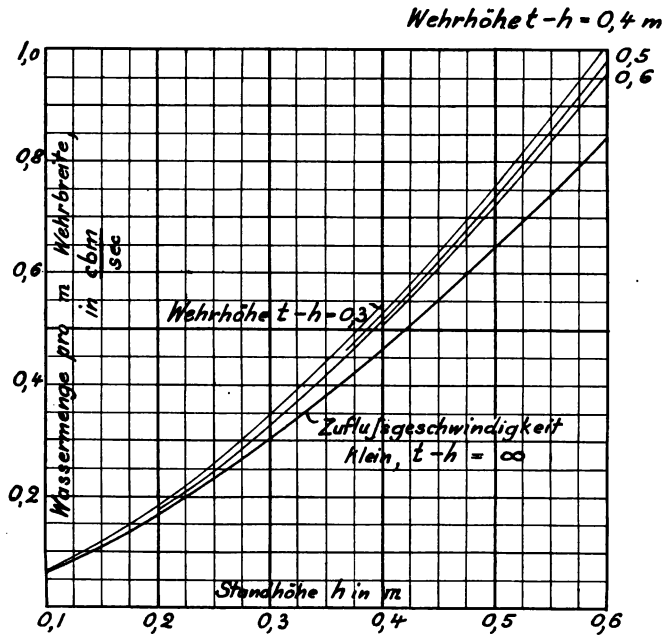


Fig. 69.

messen so weit hinter dem Wehr, daß die Krümmung der Oberfläche noch keinen Einfluß hat. Die daraus folgenden Wassermengen sind in Fig. 69, starke Linie, für den Meßbereich, für welchen die Formel gilt, graphisch dargestellt.

Diese Werte μ_0 gelten ohne weiteres, wenn die Geschwindigkeit des Wassers im Zulaufgraben so klein ist, daß sie keinen wesentlichen Einfluß ausübt — sie gelten für einen Zulaufgraben von unendlich großem Querschnitt. Im andern Fall wird mehr Wasser über das Wehr fließen und wir haben μ_0 noch mit einem Koeffizienten $\varepsilon > 1$ zu multiplizieren,

dessen Wert von der Geschwindigkeit des Wassers im Zuflußgraben, also von dem Verhältnis Standhöhe zu Kanaltiefe $\frac{h}{t}$ abhängt. Frese gibt $\varepsilon = 1 + 0{,}55\left(\frac{h}{t}\right)^2$ an.[1]) Daraus folgen Wassermengen, wie sie die schwachen Kurven in Fig. 69 für verschiedene Wehrhöhen darstellen.

Aus den Werten ε und μ_0 findet man den Ausflußkoeffizienten $\mu = \varepsilon \cdot \mu_0$, und damit die sekundliche Wassermenge $V = \frac{2}{3}\mu b\sqrt{2gh^3} = 2{,}953\,\mu b\sqrt{h^3}$. Alle Angaben in diesen Rechnungen sind in Metern zu machen.

Für Überfälle mit Seitenkontraktion werden die Verhältnisse sehr viel komplizierter, weil der Betrag der Seitenkontraktion von der Breite B des Zulaufgrabens und der Wehrbreite b abhängt. Man sollte deshalb von Überfällen mit Seitenkontraktion zu Meßzwecken möglichst keinen Gebrauch machen, oder aber wenigstens dafür sorgen, daß die Abmessungen des Zuflußgrabens so groß sind, daß man die Zulaufgeschwindigkeit und den Einfluß der Wände auf die Kontraktion vernachlässigen kann. Für diesen Fall des sehr weiten Zulaufgrabens gibt Frese $\mu = 0{,}576 + \frac{0{,}017}{h + 0{,}18} - \frac{0{,}075}{b + 1{,}2}$.

Man kann jedes Wehr in ein solches ohne Seitenkontraktion verwandeln, indem man oberhalb des Wehrs den Wasserlauf durch einen Bretterbelag auf die Wehrbreite einengt; in Fig. 68a deuten die punktierten Linien das an.

87. **Praktisches.** Das Wehr muß (Fig. 68) auf der Oberwasserseite eine senkrechte Wand bis an die Wehrkante hinan bilden, auf der anderen Seite muß es so steil abfallen, daß die Ventilation, eventuell durch Löcher a hindurch, gesichert ist. Die Wehrkante muß wagerecht und durchaus scharf sein; jede merkliche Abrundung oder Abflachung vergrößert den Wert von μ in wechselndem Maße. Es scheint wenig Einfluß zu haben, ob bei Wehren ohne Seitenkontraktion der Strahl nach Verlassen des Wehrs noch durch Seitenwände eingeengt wird, oder ob er sich frei ausbreiten kann. Das Wasser braucht hinter der Wehrkante nur so tief herabzufallen, daß die Ventilation gesichert ist: bei breiten Wehren muß man es ziemlich tief fallen lassen, oder durch Rohrleitungen künstlich ventilieren. Kurzum, der Strahl soll hinter der Wehrkante durchaus frei sein. Die Wehrkante befreie man bisweilen von Schmutz durch Entlangfahren mit einem Stab. Die Wehrkante macht man meist aus behobeltem Eisen, doch dürfte auch ein sauber scharf behobeltes Brett genügen. Genau wagerecht montiert muß sie natürlich sein.

Die Messung der Standhöhe h muß so weit aufwärts erfolgen, daß noch kein Absenken der Oberfläche statthat. Ein Meter hinter dem Wehr

[1]) Dieser Koeffizient ist Hütte 1902, I, S. 231, falsch wiedergegeben (wohl nur in einem Teil der Auflage).

zu messen, ist nach Hansen ausreichend, Francis maß 1,8 m, Frese 5 m hinter dem Wehr. Die Messung muß sorgfältig geschehen, weil es ungünstig ist, daß h in der Wehrformel in höherer Potenz steht als q, und weil es sich um nicht große Höhen handelt. Hansen hat eine Glasscheibe mit Skala in der Seitenwand des Gerinnes; das ist bequem, aber die Seitenwand wird oft nicht frei sein. Francis verwendet den Hakenmesser (Fig. 70): wenn die Spitze eben durch den Wasserspiegel tritt, kann man an der Skala die Standhöhe ablesen. Statt einer Spitze verwendet Frese deren drei, die in einer Geraden liegen; die beiden unteren müssen den Wasserspiegel von unten, die obere muß ihn von oben berühren. Die Wellenbewegung des Wasserspiegels ist bei der Messung lästig: man beobachtet am besten in einem Meßbrunnen aus Holz, in den das Wasser

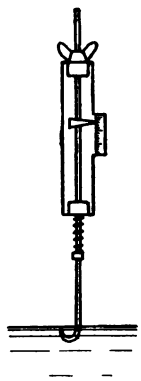


Fig. 70.
Hakenmesser.

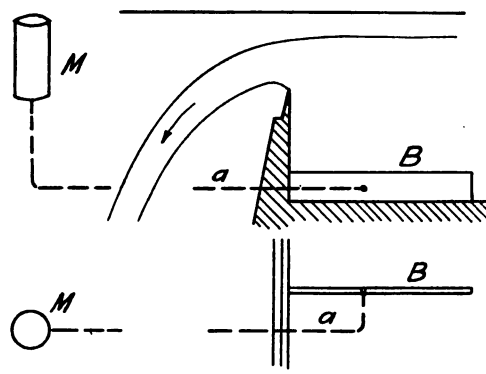


Fig. 71.

nur von unten durch ein Loch eintritt. — Nach Francis kann man auch ein Brett B mit einem Loch in die Gerinnesohle stellen, parallel zur Stromrichtung und von dem Loch aus ein Bleirohr a (Fig. 71) irgendwohin führen und in einem Meßbrunnen M von solcher Weite enden lassen, daß die Kapillarität nicht stört. Ist die Bleileitung dicht, so erhält man korrekte Messungen, selbst wenn die Leitung dicht hinter dem Wehr mündet: durch die Senkung des Spiegels wird also der Wasserdruck an der Gerinnesohle nicht beeinflußt.

Über die Wahl der Wehrbreite ist zu bemerken: Die Standhöhe h des Wassers soll nicht unter 0,1 m, besser nicht unter 0,2 m sein, sonst geben die Freseschen Formeln μ nur schlecht wieder. Die Standhöhe soll sogar möglichst groß sein, damit die Meßfehler relativ klein werden. Man wähle also die Wehrbreite b möglichst klein, doch soll sie bei fehlender Seitenkontraktion nicht kleiner als h sein, sonst wird die Reibung an den Seitenwänden störend. Versuche liegen nur mit Standhöhen h bis zu 0,5 m

vor, doch dürfte die Formel darüber hinaus verwendbar sein, sollte es nötig werden.

Als Höhe des Wehrs $t - h$, Fig. 68, genügt 0,3 m.

88. **Anwendungsbereich der einzelnen Methoden.** Beim Abwägen von Flüssigkeiten kann man Gefäße bis zu 1 cbm Inhalt verwenden, größere werden unhandlich. Mit zwei solchen Gefäßen kann man dann im besten Fall so schnell arbeiten, daß alle fünf Minuten eines voll ist. Man bewältigt also $3 \frac{\text{ltr}}{\text{sec}}$ oder $12 \frac{\text{cbm}}{\text{Stde}}$.

Nehmen wir als untere Grenze für brauchbare Wehrmessungen solche mit 0,2 m Standhöhe, bei ebenfalls 0,2 m Wehrbreite, so finden wir (Fig. 69), daß ein Wehr nicht gut weniger als $80 \frac{\text{ltr}}{\text{sec}}$ oder $288 \frac{\text{cbm}}{\text{Stde}}$ messen kann.

Zwischen diesen beiden Grenzen kommt für Messung fließender Wassermengen hauptsächlich die Ausflußöffnung in Betracht. Nach unten hin hat deren Benutzung keine bestimmte Grenze; um die obere Grenze von $80 \frac{\text{ltr}}{\text{sec}}$ zu erreichen, müßte man etwa zwei abgerundete Öffnungen von je 100 qcm Querschnitt bei 1 m Standhöhe verwenden.

Danach hat man selten die Wahl zwischen mehreren Meßmethoden. Gegebenenfalls aber wird man die Wägung der Ausflußöffnung, und diese wieder dem Wehr vorziehen. Dafür gaben wir die Gründe bei den einzelnen Methoden an.

89. **Wassermessung mit Woltmannschem Flügel.** Wo man nicht ein Wehr in ein Gerinne einbauen kann, mißt man die Wassermenge mittels des Woltmannschen Flügels (§ 57). Mit dessen Hilfe stellt man die mittlere Wassergeschwindigkeit w_m für einen Querschnitt fest. Diese multipliziert mit der Größe F des Querschnitts ergibt das sekundliche Wasservolumen: $V = F \cdot w_m$. Als Nebenarbeit hat man also das Querprofil des Gerinnes an der fraglichen Stelle durch Loten aufzunehmen.

Die Ermittlung der mittleren Wassergeschwindigkeit kann im wesentlichen auf zwei Weisen geschehen: Entweder man teilt das Querprofil (Fig. 72) in eine Reihe von Rechtecken und führt je eine Flügelmessung im Mittelpunkt jedes Rechteckes aus. Die an den Kanten verbleibenden Zwickel schlägt man zu einem der benachbarten Rechtecke. Oder man teilt das Querprofil (Fig. 73) in eine Reihe von senkrechten Streifen und bestimmt gleich die mittlere Wassergeschwindigkeit des ganzen Streifens, indem man den Woltmannschen Flügel an einer senkrecht stehenden Stange durch die ganze Tiefe des Streifens langsam und gleichmäßig ab und auf bewegt; hierzu gibt es besondere Kurbelvorrichtungen; zum Schluß liest man den Flügel ab. Flügel mit elektrischen Kontakten eignen sich zu dieser Art der Bestimmung schlechter, weil der Kontakt nicht gerade

geschlossen wird, wenn man wieder an der Oberfläche des Wassers anlangt. Einigermaßen korrekt ist die Bestimmung nach der zweiten Methode nur, wenn die Wassergeschwindigkeit groß ist gegenüber der Anlaufgeschwindig-

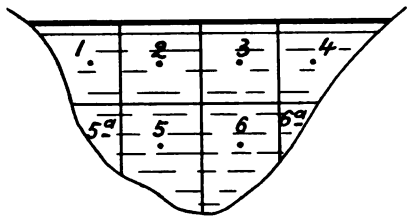


Fig. 72.

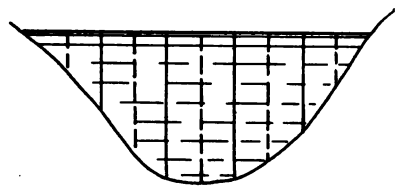


Fig. 73.

keit des Flügels, d. h. gegenüber der Konstanten b der Flügelgleichung $w = an + b$.

Die Verwertung der Meßergebnisse ist einfach.

Statt des Woltmannschen Flügels kann man auch Pitotsche Röhren anwenden.

90. **Flügelrad- und Kolbenwassermesser.** Wassermesser geben die durch eine Rohrleitung gegangene Wassermenge an einem Zählwerk an. Man

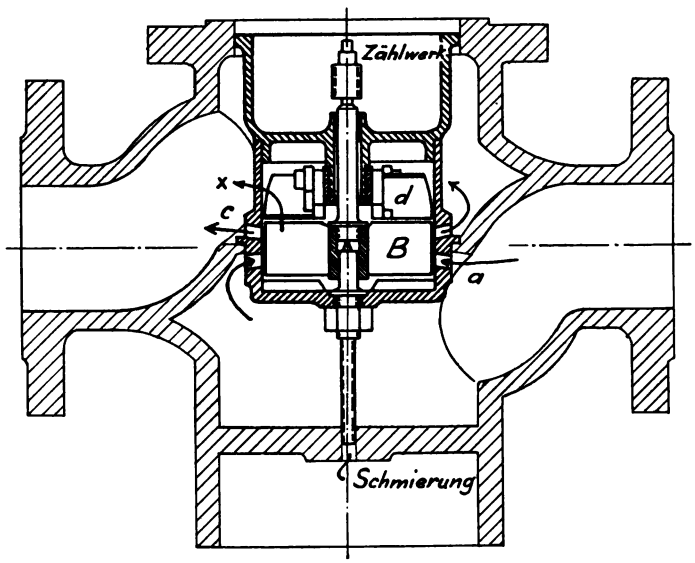


Fig. 74. Flügelradwassermesser.

unterscheidet Geschwindigkeits- oder Flügelradwassermesser und Volumen- oder Kolbenwassermesser. Erstere messen, indem sie die Wassergeschwindigkeit in der Rohrleitung registrieren, letztere, indem sie direkt einen Liter

nach dem anderen zur Messung bringen. Beide sind kleine Wassermotoren, ersterer eine Turbine, der letztere eine Wassersäulenmaschine. Die Messung geschieht in beiden Fällen durch Registrieren der Umlaufzahlen.

Zu Untersuchungszwecken wird der Wassermesser selten verwendet, man hat genauere Meßmethoden. Im Dampfkesselbetrieb dient er wohl zur Kontrolle des Heizers. Sein Hauptgebiet ist die städtische Wasserversorgung. Wir besprechen ihn daher nur kurz.

Einen Flügelradwassermesser zeigt Fig. 74. Das Wasser tritt durch die nicht radial, sondern schräg gebohrten Löcher a in den eigentlichen Messer, treibt das Flügelrad B und tritt durch die in entgegengesetztem Sinne schräg gebohrten Löcher c aus. Das Flügelrad bewegt ein Zählwerk. Solch Messer heißt rückmessend: sollte jemals Wasser in rückläufigem Sinne den Messer durchlaufen, wie das bei Pumpenstößen vorkommt, so wirkt dieses Wasser rückwärtsdrehend auf das Meßrad und die rückgängige Menge wird von der rechtläufigen ohne weiteres abgezogen. Träte das Wasser nicht durch schräge Löcher c, sondern einfach etwa in der Richtung des Pfeiles x aus dem Messer, so wird nur das vorwärtsgehende Wasser registriert und das rückläufige nicht abgezogen. Für Messung in Maschinenbetrieben, wo Stöße auftreten, sind rückmessende Messer stets vorzuziehen; für Wasserleitungszwecke genügen die anderen. Die Flügel d sind mittels Schraubenschlüssels um eine horizontale Achse drehbar. Dadurch kann man sich helfen, wenn der Messer kleine und große Massermengen verschieden registriert. Das Gleiche würde offenbar eine Erweiterung der Löcher c oder eine Änderung des Zählwerkes nicht leisten: durch solche würde die Registrierung bei kleinem und großem Wasserfluß gleichmäßig stark beeinflußt werden. Jeder Flügelradwassermesser muß irgendwie es gestatten, das Verhältnis der Registrierungen bei verschiedenem Wasserfluß einzustellen. Ein anderes Mittel wäre z. B., die Neigung der Bohrung a und c variabel zu machen, indem man sie in eingesetzte kleine Buchsen verlegt.

Den Kolbenwassermesser von Schmid zeigt Fig. 75. Das Wasser kann über und unter jeden der beiden Kolben treten. Dabei wird der Wasserzutritt und -abfluß zu jedem der Kolben durch den anderen gesteuert. Die Wasserführung ist recht kompliziert, wird indessen mit Hilfe der Pfeile ermittelt werden können, wenn man beachtet, daß jeder der Kolben im oberen Teil zwei parallele und im unteren Teil zwei gekreuzte Kanäle hat; diese Kanäle bewirken die Steuerung; und wenn man weiter beachtet, daß der Kanal a nach dem Raum A über dem Kolben I, b nach B unter I, und entsprechend c nach C über II, d nach D unter II führt; die Wand xy ist also nicht senkrecht, wie es in einem Schnitt scheint, sondern schräg gerichtet, wie der Schnitt oben links erkennen läßt. Der Messer ist ein Zwillingswassermotor, seine Umlaufzahl ist ein Maß für die durchgegangene Wassermenge; man liest diese an einem

Zählwerk ab. — Der amerikanische Worthington-Messer hat kein Kurbelgetriebe, die einfach hin und her gehenden Kolben steuern sich mit Hilfe besonderer Steuerschieber genau so, wie dies bei den bekannten Duplexdampfpumpen der Fall ist.

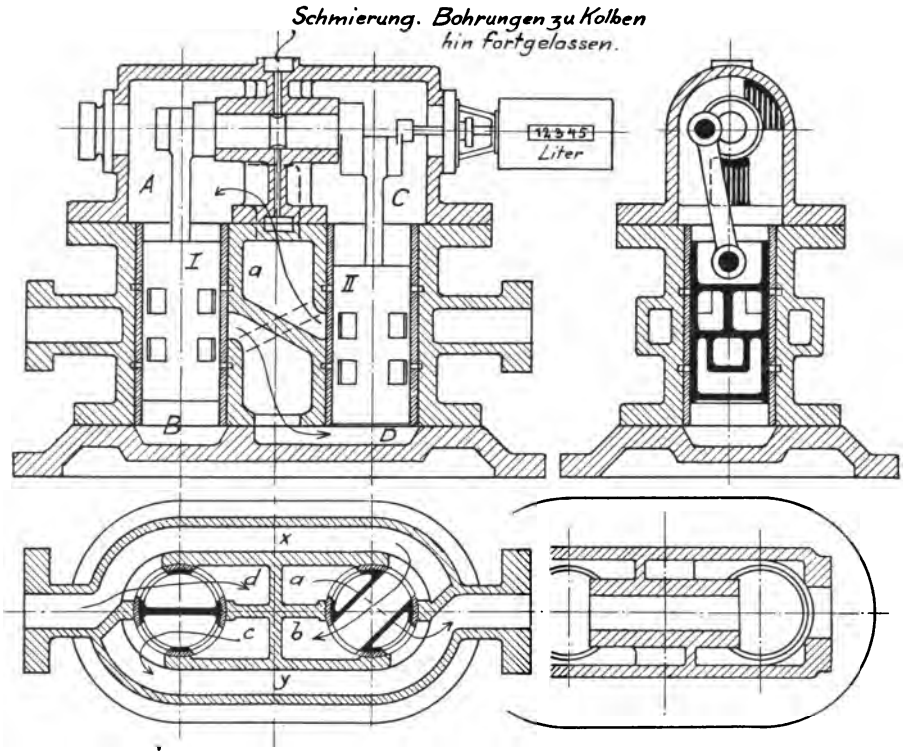


Fig. 75. Kolbenwassermesser.

91. **Anforderungen; Kritisches.** Man verlangt von einem Wassermesser, daß er richtig anzeigt; das ist sein Zweck, den man durch passende Wahl der Übersetzungsverhältnisse im Zählwerk für eine bestimmte Gangart leicht erreichen kann. Man verlangt aber weiter, daß die Angabe auch für alle Gangarten die gleiche sei, möge nun die in einer Sekunde durchgehende Wassermenge verschwindend klein oder möge sie die größte zulässige sein. Die Angabe soll sich auch im Lauf der Zeit und bei wechselndem Druck nicht ändern. Beides ist natürlich nicht durch das Zählwerk, sondern nur durch geeignete Konstruktion des Meßwerkes erreichbar. Weiter beurteilt man einen Wassermesser nach dem durch ihn verursachten Druckverlust. Der Messer ist ja eine Kraftmaschine, welche leer läuft oder doch nur das Zählwerk zu treiben hat; immerhin sind die Leerlaufwiderstände, Reibung der be-

wegten Teile und hydraulische Widerstände des Wassers in den oft verschlungenen Kanälen, zu überwinden; der hierzu nötige Energieaufwand bedingt einen Druckunterschied des Wassers vor und hinter dem Messer, welcher zum Betriebe desselben nötig ist. Dieser Druckverlust soll klein sein. Außerdem sind Unempfindlichkeit gegen Schmutzwasser und schlechte Wartung, sowie billiger Preis oft wichtige Bedingungen.

In der Genauigkeit der Messung bei wechselnden Durchflußmengen steht der Kolbenwassermesser mit Kurbeltrieb obenan. Bei jeder Gangart gibt er einen bestimmten Raum frei; ist die Gangart nicht zu schnell, so wird dieser Raum auch mit Wasser ausgefüllt. Flügelradwassermesser aber lassen sehr kleine Durchflußmengen passieren, ohne sich überhaupt zu bewegen, und im Laufe der Zeit kann viel Wasser unregistriert hindurchgehen. Erst wenn etwa 6—10 % der normalen Wassermenge durch den Messer geht, zeigen sie richtig, vorher zu wenig an. Dagegen geben die Kolbenwassermesser höheren Druckverlust, verlangen mehr Wartung und sind viel teurer. Ihre gute Eigenschaft, auch kleine Mengen zu registrieren, büßen sie ein, wenn sie verschlissen sind; dann geht Wasser durch die Undichtheiten, ohne das Zählwerk zu bewegen; ihre Angabe ändert sich, wenn der Zylinder ausgeweitet ist.

Für Versuchszwecke sind also beide Messerarten gleichwertig, wenn man nicht einen neuen Kolbenmesser verwenden kann. Man darf bei einem Versuch den Messer nur mit einer bestimmten Geschwindigkeit laufen lassen und muß seine Angabe bei dieser Geschwindigkeit durch Eichung nachprüfen, indem man das durchgegangene Wasser auffängt und wägt. Bei der Eichung muß auch die Temperatur des Wassers die gleiche sein wie beim Versuch. Dabei soll der Messer nicht zu langsam laufen, sondern die Durchflußgeschwindigkeit soll mindestens $^1/_4$ bis $^1/_5$ der normalen sein.

Angaben der Fabriken über die Leistungsfähigkeit eines Wassermessers sind so zu verstehen, daß der Messer die angegebene Wassermenge bewältigt, wenn der Druckverlust 1 at = 10 m Wassersäule ist. Dauernd soll er nicht so hoch beansprucht werden.

Wo Wassermesser in Kesselanlagen für dauernden Betrieb dienen, sollen sie in die Druckleitung der Speisepumpe geschaltet werden, an eine Stelle, wo das Wasser noch kalt ist, also vor einen Vorwärmer. Bei Injektorspeisung muß der Messer in die Saugleitung geschaltet werden, damit er kaltes Wasser bekommt und damit man nicht den vom Injektor verbrauchten Dampf mitmißt. Für diese Zwecke werden Kolbenwassermesser, namentlich nach Schmid, den Flügelradwassermessern meist vorgezogen, ob mit Recht, bleibe dahingestellt.

92. **Gasmessung; Übersicht der Methoden.** Gasmengen sind noch schwieriger und unsicherer zu messen als Wassermengen, sobald es sich um etwas größere Mengen handelt.

Solange es sich um kleine Mengen handelt, kann man das Gasvolumen direkt messen, indem man es unter geeichten Glocken auffängt. Wegen des Mangels an anderen bequemen Methoden spielen auch Gasmesser für Messung mäßiger Gasmengen eine wichtigere Rolle für unsere Zwecke, als Wassermesser es taten. Für große Luftmengen, etwa um die Luftlieferung von Gebläsen oder Kompressoren zu bestimmen, bedient man sich der Auffüllmethode, bei der man aus der Drucksteigerung in einem Behälter bekannten Inhalts auf die hineingefüllte Luftmenge schließt. Man kann das Verfahren mit Vorteil umkehren, die Luft zu irgend einem Zwecke einem Behälter bekannten Inhalts entnehmen und aus der Spannungsabnahme in diesem Behälter auf die entnommene Luftmenge schließen (Ausblasemethode). Sehr bequem ist die Verwendung von Durchflußöffnungen, welche wie ein Blindflansch in eine Rohrleitung gesetzt werden; man kann aus Beobachtung des Spannungsverlustes auf die durchgehende Luftmenge schließen, wenn man die Öffnung vorher empirisch geeicht hat. In vielen Fällen endlich muß man sich auf die sehr unsichere Berechnung der Luftmenge aus dem Indikator-Diagramm der betreffenden Maschine beschränken.

93. **Meßglocken.** Zur direkten Messung eines Gasvolumens dienen unten offene, in Wasser tauchende Blechglocken (Fig. 76); das Gas tritt durch Rohr *a* ein, dabei hebt sich die Glocke, oder es tritt durch dasselbe Rohr *a* aus, dann sinkt die Glocke. Da die Glocke genau rund hergestellt ist, so kennt man das Volumen, welches jedem gemessenen Hube der Glocke entspricht. Man kann es auch experimentell feststellen. Die Höhe des Wasserstandes ist dabei gleichgültig. Die Stellung der Glocke kann man an einer, bei großen Glocken an drei Skalen, die über den Umfang verteilt sind, ablesen.

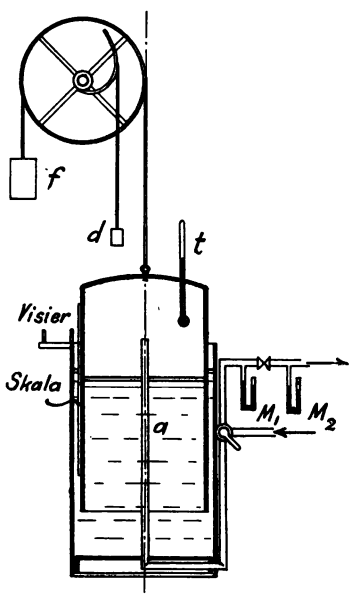


Fig. 76.

Es ist noch erforderlich, die Spannung des Gases unter der Glocke zu messen. Der Unterschied dieser Gasspannung gegen die Atmosphäre, also der Überdruck des Gases, ist durch den Niveauunterschied des Wassers innerhalb und außerhalb der Glocke gegeben: er gleicht gerade das Eigengewicht der Glocke aus; man kann ihn am Wassermanometer M_1 erkennen. Dieser Überdruck des Gases soll bei allen Stellungen der Glocke der gleiche sein, weil sonst gleichen Glockenhüben nicht auch gleiche Gasmengen

entsprechen und umständliche Reduktionen nötig werden. Bei sinkender Glocke wird das Stück der Glocke, welches in Wasser taucht und dem Auftrieb unterworfen ist, immer größer, das Eigengewicht der Glocke also immer kleiner und damit würde die Gasspannung sinken. Das verhütet Gewicht d, welches an veränderlichem Hebelarm angreift, so daß es die Änderungen des Glockengewichts ausgleicht. Um das Gas in der Glocke auf die gewünschte Spannung zu bringen, legt man bei f nach Bedarf Gewichte auf.

Die Wassertemperatur muß mit der Lufttemperatur übereinstimmen, sonst wird man nie die Gastemperatur am Thermometer t sicher feststellen können.

Bei kleinem Gasbedarf kann man das Gas direkt einer Glocke entnehmen und dadurch messen. Man hat z. B. eine Gasmaschine erst in Beharrungszustand kommen lassen und ihr dann während einer verhältnismäßig kurzen Zeit Gas aus der Gasglocke zugeführt und so ihren Gasverbrauch bestimmt. Hat man zwei Glockenapparate zur Verfügung, so kann man sie abwechselnd benutzen und die Versuche beliebig lange ausdehnen. — Meist aber dienen die Glockenapparate nur dazu, Gasmesser zu eichen, deren Verwendung dann viel bequemer, aber ungenauer ist. Diese Eichstationen für Gasmesser werden unten erwähnt werden.

94. **Gasmesser.** Gasmesser messen das Volumen des durch eine Rohrleitung gehenden Gases und registrieren die gesamte durch den Messer gegangene Gasmenge an einem Zeigerwerk. Sie werden hauptsächlich in der städtischen Gasversorgung verwendet, tun aber, wenn in genügender Größe zu beschaffen, für Gas- und Luftmessungen bei Versuchen treffliche Dienste.

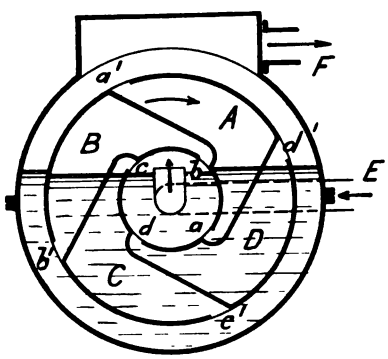


Fig. 77. Schema eines Gasmessers.

Das Schema eines Gasmessers zeigt Fig. 77. Der Messer besteht aus einer Trommel mit vier Kammern A bis D, welche in einem feststehenden Gehäuse rotiert. Der untere Teil der Trommel taucht in Wasser; dieses verschließt und öffnet die Schlitze a bis d, durch welche das Gas, von E kommend, in die vier Kammern eintreten kann, und die Öffnungen a' bis d', durch welche das gemessene Gas dem Austrittrohr F zuströmt. Man sieht, daß Kammer B gerade gefüllt wird, während die Füllung von C eben begonnen werden soll, Kammer A entleert sich, während die Entleerung von D gerade beendet ist. Man sieht auch, daß bei keiner Lage der Trommel die Schlitze a und a', oder b und b' usw. beide gleichzeitig frei sind, so daß

Gas frei hindurchkönnte; solange genügend Wasser im Messer ist, ist das Rotieren der Trommel und daher die Registrierung der Gasmengen am Zeigerwerk Vorbedingung für Passieren des Gases. Man sieht auch, daß die Drehung der Trommel dadurch erzeugt wird, daß infolge des Spannungsunterschiedes zwischen Ein- und Auslaß der Wasserspiegel in der rechten Trommelhälfte einige Millimeter höher steht als in der linken, daher sinkt die rechte Hälfte der Trommel herab. Der Gasmesser ist also ein Motor eigentümlicher Bauart, welcher in seiner Meßtätigkeit den Kolbenwassermessern an die Seite zu stellen ist.

Die Anordnung der Gasmessertrommel nach Fig. 77 wäre unpraktisch, weil sich die Schlitzweiten a bis d für den Gaseintritt schwer genügend

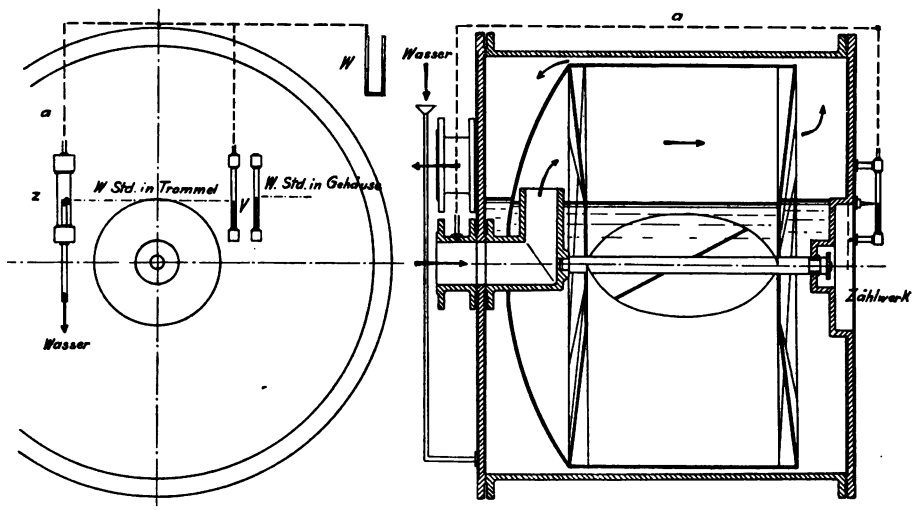


Fig. 78 und 79. Gasmesser.

groß dimensionieren ließen. Statt die Stirnwände der Trommel geschlossen herzustellen und die Schlitze an den inneren und äußeren Umfang zu legen, so daß das Gas radial durch die Trommel geht, verlegt man in praxi die Schlitze in die beiden Stirnwände und macht den Trommelumfang geschlossen. Das Gas tritt an einer Stirnwand ein, an der anderen aus, durchstreicht also den Messer in axialer Richtung. Die Schlitze für Ein- und Austritt laufen fast radial über die Trommelstirnwände hin; dabei müssen Ein- und Austrittsschlitz einer Kammer A um ebensoviel gegeneinander versetzt sein, wie a und a' in Fig. 77 es sind, d. h. um fast 180^0.

Solch Messer ist in Fig. 78 in Vorderansicht, in Fig. 79 im Schnitt dargestellt; der Gasweg ist durch Pfeile markiert. Wie die Trommel T in Kammern geteilt ist, ersieht man aus der perspektivischen Ansicht (Fig. 80), bei welcher die zylindrische Außenhülle und die gewölbte Eintrittskappe fortgelassen sind. Die

Kammer A wird durch die Schlitze a und a' bedient. Die Teilung wird durch vier Bleche von der Form Fig. 81 bewirkt, die außen an den Zylindermantel angelötet, innen durch die kleinen sternförmigen Teile an der Achse befestigt sind. Diese Trommel ist ein recht kompliziertes räumliches Gebilde, dessen Wirksamkeit genau mit dem in Fig. 77 gegebenen Schema übereinstimmt.

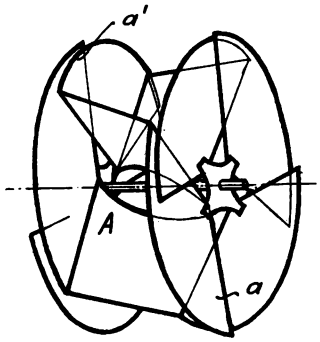


Fig. 80.

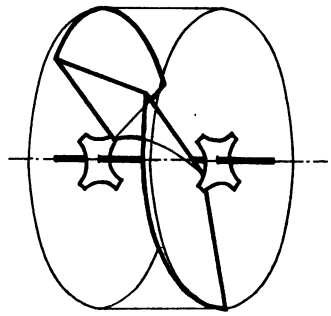


Fig. 81.

95. **Anforderungen; Praktisches.** Soll der Gasmesser genau messen, so darf er nicht zu schnell laufen, damit der Wasserspiegel ruhig bleibt. Kleine Messer machen 120, große nur 80 Umläufe in der Stunde. Daher ist der Gasmesser ein voluminöser und teuerer Apparat.

Immer dasselbe Volumen Gas wird nur dann in jeder Kammer abgeteilt, wenn der Wasserspiegel immer dieselbe Höhe hat. Das durchstreichende Gas aber sättigt sich mit Wasserdampf und so vermindert sich die Wassermenge. Für Hausanschlüsse bei Gasbeleuchtung hat man wohl Messer mit „Rückmessung", bei denen durch recht komplizierte Kammerteilung der Einfluß des Wasserstandes ziemlich aufgehoben wird. Sinkt der Wasserspiegel zu weit, so schließt ein herabsinkender Schwimmer die Gaswege ganz ab. Diese Einrichtungen interessieren uns hier nicht. Für unsere Zwecke werden wir stets einfache Messer, Experimentier- oder Stationsmesser genannt, verwenden und für richtigen Wasserstand sorgen. Zu dem Zwecke haben die kleinen Experimentiermesser eine Füllöffnung und eine Ablauföffnung; beide schraubt man auf, gießt durch die eine Wasser nach, bis es an der anderen überläuft, läßt ablaufen und verschließt beide Öffnungen wieder. In den großen Stationsmessern, Fig. 78 und 79, zirkuliert dauernd Wasser und läuft bei x über einen Überlauf hinweg ab, so daß durch die Höhenlage des Überlaufs der Wasserstand gegeben ist, und zwar der Wasserstand in den sich füllenden Kammern. Dazu ist der Überlauf durch Rohr a mit dem Gaseintritt verbunden.

Bei jeder Messung sind Druck und Temperatur zu beobachten, und zwar ist der Druck und die Temperatur des Gases in der sich füllenden Kammer am Ende der Füllungsperiode maßgebend; das Wassermano-

meter *W*, Fig. 78, ist deshalb mit dem Gaseintritt zu verbinden. Die Temperatur aber wird man am Gasaustritt messen, weil das Gas am Ende der Füllungsperiode schon durch Berührung die Temperatur des Messers und des Wassers angenommen hat; beim Eintritt in den Messer kann es irgend eine andere Temperatur haben.

Der Doppelwasserstand *V* gibt den Druckverlust im Messer an, d. i. der Unterschied des Wasserstandes in und außerhalb der Trommel. Der Druckverlust pflegt nur 2 bis 3 mm Wassersäule zu betragen.

Wo man mit Gasuhr den Verbrauch einer Gasmaschine mißt, stört der intermittierende, hubweise stattfindende Verbrauch der Maschine den Gang des Messers. Wo man dicht hinter den Messer eine Gasflamme schalten will, stört die intermittierende Wirkungsweise des Messers, der Austritt des Gases aus den einzelnen Kammern, das ruhige Brennen der Flamme. In beiden und in ähnlichen Fällen schafft ein Behälter von genügender Größe oder ein Gummiballon Abhilfe.

96. **Eichung der Gasmesser.** Das Eichen kleinerer Gasmesser geschieht, indem man Luft aus einer Glocke oder einem anderen kalibrierten Gefäß durch den Messer schickt. Die Eichung pflegt für Gasanstaltszwecke bei 40 mm Wassersäule Überdruck zu geschehen. Sonst bewirkt man sie möglichst unter den Verhältnissen, die bei dem anzustellenden Versuch herrschen, für einen Sauggasmotor also bei Unterdruck. Es verschlägt nicht viel, wenn die Glocke für den Messer zu klein ist. Man füllt sie wiederholt und schickt eine nach der anderen Füllung durch den Messer. — Glockenapparate, die speziell für schnelle Eichung von Gasmessern in größerer Zahl eingerichtet und teilweise selbsttätig sind, mit dazu gehörigen Anschlüssen, heißen Eichstationen.

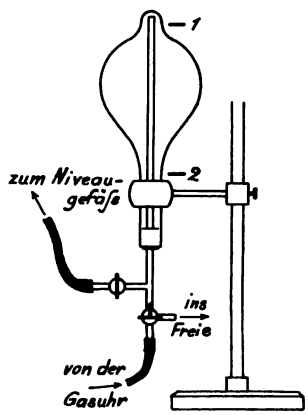


Fig. 82.

Statt einer Glocke kann man auch die Eicheinrichtung nach Junkers, Fig. 82, verwenden: Die Glasbirne hat zwischen den Marken *1* und *2* einen bekannten Inhalt. Durch Heben und Senken einer mit Schlauch angeschlossenen Niveauflasche und Steuern des Dreiweghahnes saugt man eine Füllung nach der andern vom Messer an und entläßt sie ins Freie.

Große Messer eicht man meist mit Hilfe eines kleineren Normalmessers; durch beide Messer hintereinander wird die gleiche beliebige Luftmenge geschickt, beider Angaben müssen gleich sein. Man eicht mit der sekundlichen Luftmenge, welche der Normalmesser zuläßt, und benutzt den größeren dann bis zu der Tourenzahl, welche erfahrungsmäßig zulässig ist — wie erwähnt, 80 bis 100 in der Stunde.

Beim Eichen müssen alle Apparate gleiche Temperatur haben. Unterschiede von 3° C entsprechen einem Fehler von 1%. Korrektionen, durch die man ungleiche Temperaturen berücksichtigen wollte, sind immer unsicher, weil ja nicht nur das Gas, sondern auch die Meßapparate mit der Temperatur sich ausdehnen, wenn auch weniger. Eine Gasmessereichung muß also eigentlich auch noch bei derselben Temperatur vorgenommen werden, bei welcher der Messer später benutzt werden wird.

Gasmesser werden von den Eichämtern geeicht; Normalgasmesser insbesondere kann man auch von der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt eichen lassen.

97. **Auffüllmethode.** Eine leidlich sichere Messung von Gasmengen kann man durch Auffüllen eines Behälters von bekanntem Inhalt und Beobachten der Spannungszunahme erzielen.

Diese Methode ist namentlich zur Bestimmung der Luftlieferung von

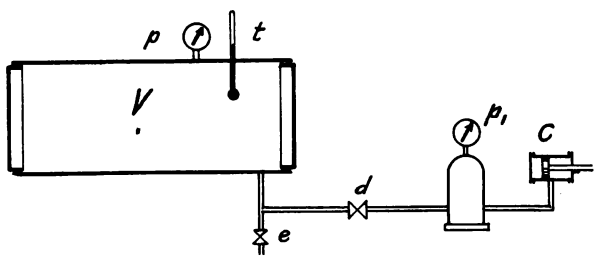


Fig. 83.

Kompressoren üblich. Die Anordnung ist in Fig. 83 dargestellt. Der Kompressor C komprimiert die Luft auf einen Druck p_1, mit dem sie im regulären Betriebe an irgend einen Verwendungsort geht. Jetzt aber geht sie in einen Behälter von bekanntem Volumen V, an dem man Spannung p und Temperatur t jederzeit ablesen kann. Ein Drosselventil d sorgt dafür, daß man den Kompressor gegen einen beliebigen konstanten Druck arbeiten lassen kann, während in V der Druck ansteigt; d muß dazu ständig nachreguliert werden. Durch Ventil e läßt man vor Beginn und nach Beendigung des Versuches die Luft ins Freie blasen.

Sei nun am Anfang eines Versuches die Spannung im Behälter p_1, am Ende p_2 festgestellt worden, sei t oder absolut T die Temperatur im Behälter und R die Gaskonstante, so ergibt sich die eingefüllte Luftmenge wie folgt: In einem Raum vom Inhalt V ist, beim Zustand p und T, ein Luftgewicht $G = \frac{V \cdot p}{R \cdot T}$ vorhanden. Also ist am Anfang unseres Versuches $G_1 = \frac{V \cdot p_1}{R \cdot T}$ und am Ende $G_2 = \frac{V \cdot p_2}{R \cdot T}$ im Behälter vorhanden, eingefüllt

haben wir also $G = G_2 - G_1 = \frac{V}{RT}(p_2 - p_1)$. Das eingefüllte Luftvolumen, reduziert auf 0° C und 760 mm BStd. wäre dann $V_0 = \frac{G}{1{,}293}$, trockene Luft vorausgesetzt (§ 69).

Die Auffüllmethode mißt also das Luftgewicht oder was damit gleichbedeutend ist, das reduzierte Luftvolumen. Ihre Ergebnisse sind daher nicht ohne weiteres mit den Angaben der Gasuhr vergleichbar.

Bei der Versuchsausführung tut man gut, zunächst Ventil *e* zu schließen und nun festzustellen, wann Manometer *p* durch einen, wann durch einen zweiten beliebigen Teilstrich geht. Sonst ist im Behälter *V* schon anfangs, trotzdem *e* offen ist, ein beträchtlicher Überdruck, den das Manometer nicht anzeigt, weil diese Instrumente nahe dem Nullpunkt schlecht zeigen.

Der wunde Punkt der Auffüllmethode ist die Temperaturmessung. Die Temperatur im Behälter wird nämlich nicht konstant bleiben: erstens kann die vom Kompressor kommende Luft eine andere Temperatur haben als die im Behälter befindliche, so daß wir nachher die Mischungstemperatur haben müßten, doch lassen sich solche Temperaturdifferenzen vermeiden, auch unschwer berücksichtigen durch Beobachten der Temperatur der ankommenden Luft. Zweitens aber wird ja die im Behälter vorhandene Luft durch die hinzukommende komprimiert, und also Kompressionswärme erzeugt. Deren Betrag wäre ja wohl zu berechnen, aber der größte Teil der Wärme wird schon während des Versuches an die Behälterwand abgegeben — nur weiß man nicht, wieviel. Ein Thermometer *t* gibt schwerlich die mittlere Temperatur im Behälter an, folgt außerdem den Temperaturänderungen zu langsam, wenn seine Kugel nicht direkt von der Luft des Behälters umgeben ist, sondern in einem Stutzen steckt.

Genaue Messungen könnte man erzielen, wenn man dafür sorgte, daß man die Ablesung der Spannung am Ende des Versuches im Temperaturgleichgewicht vornehmen könnte. Ein Wechselhahn statt des Ventils *d* wäre nötig, um plötzlich den Behälter abzusperren und zugleich den Kompressor irgendwo sonst hin, etwa ins Freie, ausblasen zu lassen. Dann könnte man den Temperaturausgleich mit der Umgebung abwarten, und nun Druck und Temperatur ablesen. Dichtheit des Behälters wäre Bedingung. Fände man übrigens zwischen Anfang und Ende des Versuches einen Temperaturunterschied, so wäre $G = \frac{V}{R}\left(\frac{p_2}{T_2} - \frac{p_1}{T_1}\right)$ das eingefüllte Luftgewicht.

In der Praxis begnügt man sich meist mit dem ungenaueren Verfahren. Jedenfalls aber sollte man dafür sorgen, daß die in den Behälter tretende Luft abgekühlt ist, dazu darf die Leitung vom Kompressor zum Behälter nicht zu kurz sein.

98. **Ausblasemethode.** Die Auffüllmethode läßt sich umkehren und gibt dann einwandsfreiere Resultate: man kann, um irgend einen Luft-

verbrauch zu messen, die nötige Luft einem Behälter bekannten Inhalts V entnehmen, der vorher mit Druckluft gefüllt war und dessen Spannungsverminderung man beobachtet. Die Rechnung bleibt die gleiche. Die Temperaturmessung ist jetzt sehr viel sicherer auszuführen, denn man kann das Thermometer in das Entnahmerohr verlegen und bekommt so mit einiger Sicherheit die mittlere Temperatur im Behälter.

Diese Ausblasemethode teilt mit der Auffüllmethode den Nachteil, daß man sie nur für kurze Versuche, nicht für Dauerbetrieb verwenden kann.

99. **Durchflußöffnungen.** Dagegen sind für Dauerversuche Durchflußöffnungen sehr bequem. Das sind kreisrunde Löcher, welche in Blechscheiben von passender Größe geschnitten werden. Die Scheibe (Fig. 84) wird wie ein Blindflansch in die Rohrleitung eingeschaltet, in welcher man die Luftgeschwindigkeit feststellen will. Bei bestimmten Druckverhältnissen beiderseits, die man mit einem Differential- und einem gewöhnlichen Manometer feststellt, und bestimmten Temperaturen ist der Luftdurchgang durch die Öffnung gegeben.

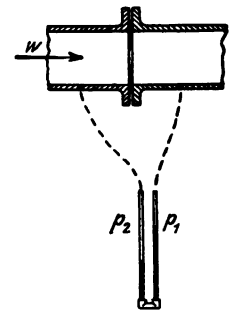


Fig. 84.

Man wird die Durchflußöffnung nicht zu eng wählen, um große Spannungsverluste zu vermeiden. Die Öffnung kann etwa den halben Querschnitt der Rohrleitung haben. Dann, das heißt wenn der Spannungsverlust nicht mehr als $^1/_{10}$ bis $^1/_{20}$ des absoluten Druckes beträgt, kann man die thermodynamischen Verhältnisse unbeachtet lassen und das Gas als nicht expansibel, wie eine Flüssigkeit behandeln.

Die Druckdifferenz $p_2 - p_1$ beschleunigt die Luftmasse und erteilt ihr eine Geschwindigkeit w' in der Mündung. Es ist $w' = \sqrt{2gh}$, wo h die dem Druck $p_2 - p_1$ gleichwertige Luftsäule in Metern. Nun würde ein Luftwürfel von 1 m Seitenlänge und vom spezifischen Gewicht $\gamma \frac{\text{kg}}{\text{cbm}}$ auf seine Unterlage infolge seiner Schwere — denn nur diese kommt in der Formel $w' = \sqrt{2gh}$ in Frage — einen Druck von $\gamma \frac{\text{kg}}{\text{qm}}$ ausüben; eine h m hohe Luftsäule, sagen wir von 1 qm Querschnitt, übt also den Druck $p = h\gamma$ auf ihre Unterlage aus. Also wird $w' = \sqrt{2g\frac{p}{\gamma}}$, und wenn in unserem Fall die Druckdifferenz $p_2 - p_1$ in Geschwindigkeit umgesetzt wird, so ist theoretisch $w' = \sqrt{\frac{2g(p_2 - p_1)}{\gamma}}$.

Dieser theoretischen Geschwindigkeit entspricht ein durch die Öffnung gehendes Gasvolumen (nicht auf 0° C und 76 cm Qu. reduziert)

$$V' = F \cdot w' = F\sqrt{\frac{2g}{\gamma}}\sqrt{p_2 - p_1}\,.$$

Oder es entspricht ihr ein hindurchgehendes Gasgewicht

$$G' = V' \cdot \gamma = F \sqrt{2 g \gamma} \sqrt{p_2 - p_1},$$

oder endlich bei trockener Luft ein reduziertes Volumen

$$V_0' = \frac{1}{1{,}29} F \sqrt{2 g \gamma} \sqrt{p_2 - p_1}.$$

100. In Wahrheit wird die Gasmenge kleiner sein infolge von Kontraktionserscheinungen. Das wirkliche Luftvolumen ist $V = \mu \cdot V'$, das wirkliche Luftgewicht $G = \mu \cdot G'$. Den Ausflußkoeffizienten μ muß man von Fall zu Fall experimentell bestimmen, indem man nach der Ausblasemethode des vorigen Paragraphen oder mittels der Gasuhr die wirklich durchgehende Luftmenge feststellt. Bei dieser Eichung müssen Druck und Temperatur möglichst genau die gleichen sein wie beim Versuch. Es ist oft bequemer, eine Öffnung in die zu untersuchende Leitung zu bauen und sie dann zu eichen, als die Gasuhr selbst einzubauen.

Die Luftmessung mit Durchflußöffnungen läuft also auf eine rein empirische Grundlage hinaus. Man stellt die durchgehende Luftmenge von Fall zu Fall experimentell fest; allgemeine Angaben für den Wert von μ lassen sich, zurzeit wenigstens, nicht machen. Die theoretischen Formeln gaben wir nur an, um die Umrechnungen zu ermöglichen, welche nötig werden, wenn die Verhältnisse bei der Eichung von denen beim Versuch etwas abweichen. Diese Umrechnungen sind nicht im einfachen Verhältnis von Druck und Temperatur, sondern im Verhältnis der Wurzeln vorzunehmen.

Um eine passende Lochweite wählen zu können, kann man überschläglich mit einem Ausflußkoeffizienten 0,6 bis .0,7 rechnen.

101. **Luftmessung mit Anemometer.** Bei Lüftungs- oder Kühlanlagen bestimmt man die durch die Kanäle gehende Luftmenge, indem man den Kanalquerschnitt regelmäßig zerlegt und für jeden Ausschnitt die Luftgeschwindigkeit mit Anemometer oder Pitot-Rohr (Kap. VII) feststellt. Daraus läßt sich die Luftmenge berechnen. Die Methode entspricht der in § 89 für Wasser gegebenen. Man soll durch seinen Körper die Luftbewegung möglichst wenig stören.

Ebensogut kann man natürlich die mittlere Geschwindigkeit bestimmen, indem man das Anemometer in dem Querschnitt hin und her bewegt, während es läuft, etwas planmäßig, so daß alle Teile des Querschnittes einigermaßen gleichmäßig zur Geltung kommen.

102. **Luftmenge aus dem Diagramm.** Nicht selten ermittelt man die von einem Kompressor oder einem Gebläse gelieferte Luftmenge aus dem Indikatordiagramm der Maschine. Diese Methode ist bisweilen recht unsicher und dann ein Notbehelf.

In einem Diagramm, Fig. 85, ist die ganze Diagrammlänge $a\,b$ ein Maß für den Hub der Maschine oder auch für das vom Kolben bei seinem

ganzen Hube freigegebene Hubvolumen. Offenbar könnte sich im besten Fall dieses Hubvolumen mit Luft füllen und vom Kompressor gefördert werden. In Wirklichkeit saugt der Kompressor von a bis c nicht, weil während dieses Teiles Expansion aus dem schädlichen Raum stattfindet. Erst von c an findet Saugen statt. Die Strecke cb ist ein Maß für das geförderte Luftvolumen. Da wir wissen, daß ab das Hubvolumen, sagen wir 0,5 cbm, vorstellt, und aus dem Diagramm entnehmen können, daß cb 88 % des Hubvolumens ist, so folgern wir, daß die Maschine $0{,}5 \cdot 0{,}88 = 0{,}44$ cbm Luft bei jedem Hube fördert. — Dabei ist c immer der Schnittpunkt der Expansions- mit der Atmosphärenlinie.

Wir haben in dieser Weise das vom Kompressor geförderte Luftvolumen bestimmt. Meist braucht man das geförderte Luftgewicht oder reduzierte Volumen. Bei der Umrechnung tritt nun eine Schwierigkeit auf: man kennt nicht die Temperatur des gemessenen, durch bc dargestellten Volumens. Sie ist nicht etwa die Temperatur der äußeren Luft, weil Kompressorzylinder heiß sind, also die angesaugte Luft sich sofort erwärmt. Man hilft sich meist, und wie Versuche gezeigt haben mit leidlicher Genauigkeit, dadurch, daß man die Temperatur der durch das Druckventil tretenden Luft durch ein dicht hinter dem Ventil angebrachtes Thermometer mißt. Dieses ist also die Kompressionsendtemperatur im Punkte d des Diagramms. Kennt man den schädlichen Raum des Kompressors, so hat man nun für den Punkt d sowohl Druck p als auch Volumen v und Temperatur T. Für den Punkt b kennt man p und v, also kann man aus der Zustandsgleichung $\frac{pv}{T} = \text{Konst.}$ die Temperatur im Punkte b berechnen.

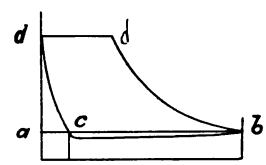


Fig. 85.

Viel weniger zuverlässig wäre es, die Kompressionskurve bd als Adiabate zu betrachten und einfach aus dem Verhältnis der absoluten Drucke in b und d auf das Verhältnis der Temperaturen zu schließen.

Eine Unsicherheit des ganzen Verfahrens erhellt aus folgender Überlegung: Ist das Saugventil des Kompressors undicht, so fällt die Expansionslinie steiler ab als sonst. Scheinbar wird also jetzt mehr Luft gefördert. Man sieht, daß das in Wahrheit nicht der Fall ist: es wird nur die durch das undichte Ventil entwichene Luft wieder hereingeholt. Die Ermittelung der Luftmenge aus dem Diagramm gibt also falsche Werte, sobald die Ventile undicht sind.

Wo man eine andere Meßmethode — Gasuhr, Auffüllmethode — zur Verfügung hat, wird man diese wohl vorziehen. Bei großen Maschinen aber versagen alle anderen Methoden.

103. **Dampfmessung durch Kondensieren.** Dampfmengen mißt man meist nicht als solche, sondern man mißt das Wasser, aus dem der Dampf

entstand oder das bei seiner Kondensation entsteht. Man mißt also, bei einer Dampfmaschine und einer Dampfheizung, entweder die in den Dampfkessel gespeiste oder die von der Kondensatorpumpe oder dem Kondenstopf ausgeworfene Wassermenge.

Die Besprechung der Versuchsanordnungen gehört nicht in ein Werk über Meßkunde, sondern in ein solches über Untersuchungsmethoden. Bemerkt sei nur, daß man bei Messung des wieder kondensierten Wassers dafür zu sorgen hat, daß das Wasser abgekühlt wird, bevor es ins Freie tritt, damit nichts durch Verdampfen verloren geht.

104. **Kalorimetrische Dampfmessung bei Mischkondensationen.** Bei Mischkondensationen kann man die kondensierte Dampfmenge G_d aus der Menge G_w und der Temperaturerhöhung Δt des Kühlwassers kalorimetrisch berechnen. Der Dampf gab die latente Wärme von rund 600 WE pro kg ans Kühlwasser ab; dieses nimmt $G_w \cdot \Delta t$ WE auf. Beide Wärmemengen sind einander gleich: $G_d \cdot 600 = G_w \cdot \Delta t$, woraus $G_d = G_w \cdot \frac{\Delta t}{600}$ folgt. Mißt man das Kühlwasser nicht allein, sondern nachdem es den Dampf kondensiert hat, mißt man also $G_w + G_d$, so ist $G_d = (G_w + G_d) \cdot \frac{\Delta t}{\Delta t + 600}$.

Diese Meßmethode ist im allgemeinen unzulässig, wenigstens sind ihre Resultate mit den durch Wassermessung erhaltenen nicht direkt vergleichbar. Jeder Dampf enthält nämlich Feuchtigkeit. Dieses in Tropfenform mitgenommene Wasser wird bei den Methoden des vorigen Paragraphen wie Dampf vermessen: die soeben besprochene kalorimetrische Methode aber mißt nur die wirklich in Dampfform vorhandene Dampfmenge und läßt dessen Feuchtigkeit ganz unbeachtet. Da nun der Dampf zwar beim Eintritt in eine Maschine nicht mehr als 2 bis 5 % Feuchtigkeit zu enthalten pflegt, beim Verlassen der Maschine aber bis zu 30 % und noch mehr Wasser mit sich führt, so sieht man, wie falsche Ergebnisse die kalorimetrische Messung veranlaßt.

105. **Dampfmessung aus dem Diagramm.** Ein Gleiches gilt von der Ermittlung des Dampfverbrauches aus dem Diagramm der Maschine. Jeder Punkt des Diagramms gibt zusammengehörige Werte von Volumen und Spannung des eingeschlossenen Dampfes; aus diesen beiden Daten läßt sich ein Dampfgewicht berechnen, und dieses mit der Hubzahl der Maschine multipliziert, ergibt den minutlichen Dampfverbrauch. Aber auch hier erhalten wir nur das, was als Dampf im Zylinder vorhanden ist; was in Form von Wasser da ist, hat praktisch kein Volumen und bleibt unberücksichtigt. Die Ergebnisse decken sich nicht mit Gewichtsmessungen.

106. **Dampfmesser.** In vielen Betrieben ist es wünschenswert, den momentanen Dampfverbrauch irgend eines Apparates jederzeit erkennen zu können, ohne einen besonderen Versuch machen zu müssen, und weiterhin auch den in längerer Zeit insgesamt verbrauchten Dampf jederzeit ablesen

zu können. Ein solches Bedürfnis nach einem Dampfmesser, der den Wasser- und Gasmessern analog arbeitet, liegt namentlich in chemischen Betrieben vor, wo Dampf zu Kochzwecken benutzt wird; wenn in einzelnen Städten noch Dampfzentralen bestehen, welche Dampf für Arbeits- und Heizzwecke an Konsumenten abgeben, so wünscht man ebenfalls den Verbrauch jeder Anschlußstelle messen zu können.

Die vorhandenen Dampfmesser mögen für die genannten Zwecke brauchbar sein, wo es sich mehr um relatives als um genaues absolutes Messen handelt. Für Maschinenuntersuchungen sind sie nicht ausreichend, weil sich ihre Angaben mit der Spannung und mit der Feuchtigkeit des Dampfes ändern, und weil sie überhaupt nur ungenau arbeiten. Der Dampfmesser von Gehre ist in Z. d. V. D. I. 1900, S. 1694 beschrieben.

107. **Durchflußöffnungen.** Kann man die Dampfmessung nicht durch Wägen des Kondensates vornehmen, so ist die Anwendung von Durchflußöffnungen zu empfehlen, die man in die Frischdampfleitung schaltet. Alles gilt, was bei Luftmessungen (§ 99) über sie gesagt wurde: bei nur kleinen Spannungsverlusten kann man den Dampf wie ein Gas behandeln.

IX. Messung der Spannung.

108. **Definition.** Flüssigkeiten geben, wenn sie an einer Stelle einen Druck empfangen, diesen nach allen Richtungen und durch die ganze Flüssigkeit hindurch weiter. Die Flüssigkeitsteilchen üben daher aufeinander und auf die Gefäßwand Pressungen aus, so zwar, daß auf jede Flächeneinheit dieselbe Kraft kommt, gleichgültig, welche Richtung und Gestalt die Fläche hat. Den auf die Flächeneinheit kommenden Druck nennt man den spezifischen Druck oder die Spannung der Flüssigkeit.

Für Gase gilt das gleiche, nur daß sie eine Spannung nicht nur weitergeben, sondern sie durch ihr Expansionsbestreben geradezu erzeugen, ihr Verhalten ist ein mehr aktives.

Auch auf feste Körper ist der Begriff der Spannung anwendbar, doch kann die Spannung an verschiedenen Punkten verschieden sein, und an ein und demselben Punkt ist sie nach verschiedenen Richtungen hin nicht die gleiche. Die Spannung fester Körper wird bei Materialprüfungen festgestellt. An diesem Ort handelt es sich nur um die Spannung von Flüssigkeiten und Gasen. Diese sind stets Druckspannungen. Bei festen Körpern können auch Zugspannungen vorkommen, die nötigenfalls durch ein negatives Vorzeichen kenntlich gemacht werden.

109. **Einheiten.** Die Spannung ist also die auf die Flächeneinheit ausgeübte Kraft. Demnach ist ihre Einheit diejenige Spannung, welche auf das Quadratmeter Fläche die Kraft von einem Kilogramm ausübt: $1\left[\frac{\text{kg}}{\text{qm}}\right]$.

Man benutzt diese Einheit nur bei wärmemechanischen Rechnungen, bei denen man sich, um Irrtümer zu vermeiden, streng an das korrekte Maßsystem halten muß.

In der Praxis ist als Einheit der Spannung das Kilogramm pro Quadratcentimeter gebräuchlich, weil man dadurch die Resultate in weniger hohen Zahlen erhält. Es ist $1\,\frac{\text{kg}}{\text{qcm}} = \frac{1\text{ kg}}{\frac{1}{10000}\text{ qm}} = 10000\,\frac{\text{kg}}{\text{qm}}$. Man bezeichnet diese Einheit auch wohl als metrische Atmosphäre: $1\,\frac{\text{kg}}{\text{qcm}} = 1\,\text{at}$. Diese Benennung rührt daher, daß die durch Barometer meßbare Spannung der uns umgebenden Luftatmosphäre ungefähr $1\,\frac{\text{kg}}{\text{qcm}}$ beträgt: sie wechselt bekanntlich je nach der Höhenlage des Beobachtungsortes und je nach der Witterung.

Außer diesen vom technischen Maßsystem hergeleiteten sind noch rein empirische Einheiten gebräuchlich, namentlich zur Angabe kleiner Spannungen und in physikalischen Kreisen. Diese empirischen Einheiten sind das Centimeter Quecksilbersäule oder Wassersäule und die physikalische Atmosphäre von 76 cm Quecksilbersäule.

Eine Quecksilbersäule wird nämlich unter dem Einfluß der Schwerkraft auf die sie unten abschließende Fläche eine Spannung ausüben, welche von der Höhe der Säule abhängt, also durch deren Höhe gemessen werden kann. Habe die Säule etwa 1 qcm Querschnitt und eine Höhe von h cm, so ist das Quecksilbervolumen h ccm und das Quecksilbergewicht bei 0 ° C Temperatur $13{,}60 \cdot h$ Gramm. Dieses ist also auch die Kraft, welche die Säule auf das sie unten abschließende Quadratcentimeter ausübt. Der Quecksilbersäule von h cm entspricht also eine Spannung von $13{,}60 \cdot h\,\frac{\text{gr}}{\text{qcm}}$, oder es ist 1 cm Qu. $= 0{,}01360\,\frac{\text{kg}}{\text{qcm}}$; oder auch $1\,\frac{\text{kg}}{\text{qcm}} = 73{,}53$ cm Qu.

Kleine Spannungen mißt man wohl in cm Wassersäule. Im Pumpenbau mißt man auch nach Metern Wassersäule. Es ist 13,6 cm WS = 1 cm Qu. und 10 m WS $= 1\,\frac{\text{kg}}{\text{qcm}}$ (nur bei 4 ° C!).

Eine Spannung von 76 cm Qu. $= 1{,}033\,\frac{\text{kg}}{\text{qcm}}$ wird im allgemeinen als normaler Barometerstand am Meeresspiegel angesehen und deshalb auch als (physikalische) Atmosphäre bezeichnet. Diese letztere Benennung sollte man auf jeden Fall in technischen Werken vermeiden, weil das Vorhandensein zweier gleichbenannter Einheiten, die noch dazu nur um reichlich 3 % voneinander verschieden sind, dauernd zu Irrtümern Anlaß gibt, die größer als zulässig, aber zu klein sind, als daß man sie ohne weiteres bemerkte. Ganz entraten kann man der Annahme von 76 cm Qu. als

normalen Barometerstand deshalb nicht, weil man die Gasvolumina und die Siedepunkte auf diesen Normaldruck einmal zu beziehen pflegt, weil die Thermometerskala auf der Annahme dieses Barometerstandes beruht, und weil daher die Zahlen für das Wärmeäquivalent, für die spezifischen Gewichte, die Ausdehnungskoeffizienten, kurz viele Tabellenwerke geändert würden. Man kann aber Verwechselungen dadurch umgehen, daß man z. B. sagt, man beziehe das Gasvolumen auf 76 cm Qu., statt: auf Atmosphärenspannung. Außerdem wird man grundsätzlich nur diesen Normaldruck, nicht aber vielfache desselben in die Rechnung einführen.

Eine Angabe in Quecksilbersäule meint immer eine Säule von 0^0 C. Die Reduktion für den Fall, daß das Quecksilber wärmer ist, wird unten besprochen werden (Fig. 88).

Im englischen Maßsystem ist die Einheit der Spannung das Pfund pro Quadratzoll; es ist $1 \frac{\text{kg}}{\text{qcm}} = 14{,}22 \frac{\text{Pfd.}}{\text{Qu. Z}}$. Man liest Quecksilbersäulen in Zollen ab und sieht 30 Zoll Qu. = 76,199 cm Qu. als normalen Barometerstand an.

110. **Manometer und Vakuummeter, absoluter Druck, Überdruck, Vakuum.** Die Instrumente zum Messen der Spannung heißen Manometer; wenn sie Spannungen unter der Atmosphäre, also ein Vakuum angeben, auch wohl Vakuummeter.

Eindringlich ist nun darauf hinzuweisen, daß alle Manometer nicht Spannungen anzeigen, sondern Spannungsunterschiede. Die gewöhnlichen Manometer, deren Einrichtung weiterhin zu besprechen sein wird, geben den Unterschied der Spannung in dem zu untersuchenden Raum gegen die augenblickliche Spannung der umgebenden Atmosphäre; im Arbeitsraum einer Druckluftgründung gäben sie den Unterschied gegen die Spannung in diesem Raum an. Die von einem Manometer gemachte Angabe bezeichnet man deshalb als Überdruck, und wenn es sich um ein Vakuum handelt, als Unterdruck.

Die absolute Spannung in dem zu untersuchenden Raum ist die Summe: Barometerstand plus Überdruck, oder aber die Differenz: Barometerstand minus Unterdruck. Bei jeder Spannungsmessung hat man also auch noch den Barometerstand zu beobachten: das Barometer ist der einzige Spannungsmesser, welcher absolute Spannungen angibt. — Bei Kondensationsanlagen benutzt man wohl abgekürzte Quecksilberbarometer, diese geben dann unmittelbar die absolute Spannung im Kondensator an (vgl. Fig. 91).

111. **Kritik der Vakuumangaben.** Wo eine Vakuumspannung anzugeben ist, insbesondere also bei Kondensationsdampfmaschinen und bei Vakuumkochgefäßen, kann die Angabe auf verschiedene Weise geschehen.

Zunächst kann man die Vakuumangabe einfach so belassen, wie man sie abliest, also die Angabe, wie im vorigen Paragraphen ausgeführt, auf

auch dies theoretisch unzulässig ist, doch verschwinden die auftretenden Fehler, wenn es sich um größere Spannungen über der atmosphärischen handelt, wo dann die Schwankungen des Barometerstandes unbedeutend sind gegenüber der Gesamtspannung.

112. **Übersicht der Meßmethoden.** Zum Messen der Spannung dienen die Manometer. Diese können Flüssigkeitsmanometer sein, bei denen die Spannung durch die Säule einer Flüssigkeit ausbalanziert und gemessen wird, meist mit Quecksilber oder Wasser. Da die Flüssigkeitsmanometer an die senkrechte Lage gebunden und zerbrechlich, auch unbequem zu beobachten sind, so verwendet man lieber Metallmanometer, welche entweder eine Bourdonsche Röhrenfeder oder eine Plattenfeder enthalten, deren Verbiegung unter dem Einfluß der Spannung beobachtet wird.

Für sehr kleine Spannungen benutzt man wohl Plattenfederinstrumente, die Plattenfeder wird aber dünn und empfindlich. Die Flüssigkeitsmanometer ergeben schließlich selbst mit Wasser- oder noch leichterer Füllung eine zu enge Teilung. Man hat deshalb Vorrichtungen mit mehreren Flüssigkeiten im Gebrauch, so zwar, daß entweder die Differenz oder der Quotient der spezifischen Gewichte beider Flüssigkeiten die Skalenteilung bestimmt. Man kann so auf genügend weite Skalenteilungen kommen. Für kleine Spannungen sind noch einige andere Spezialinstrumente im Gebrauch; sie heißen Zugmesser.

Für sehr große Spannungen kann man immer noch Metallmanometer mit Bourdon-Feder verwenden. Während man aber gewöhnliche Metallmanometer durch Vergleich mit einer Quecksilbersäule eicht, welche ja ihrerseits ohne Eichung zuverlässig ist, so fehlt uns diese Normalie für Eichung von Manometern für hohe Spannung; denn Quecksilbersäulen von mehr als 25 m Höhe, entsprechend etwa 33 at Spannung, sind kaum ausführbar. Als Normalinstrumente bei höheren Spannungen benutzt man Kolbenmanometer. In diesen wird durch Auflegen von Gewichten die Kraft gemessen, welche die zu messende Spannung auf einen Kolben bekannten Querschnitts ausübt.

Wir erwähnten schon früher, daß jedes Manometer nicht Spannungen, sondern Spannungsdifferenzen anzeigt, den Unterschied nämlich der Spannung in dem untersuchten Raum gegen die Spannung der umgebenden Atmosphäre. Mit dem Namen Differentialmanometer aber belegt man noch insbesondere solche Instrumente, welche den Unterschied in der Spannung zweier Räume angeben, unbekümmert um die absolute Höhe der Spannung und unbekümmert um die Spannung der umgebenden Atmosphäre. Differentialmanometer haben fast immer sehr kleine Spannungsunterschiede anzuzeigen, welche man durch Beobachtung zweier getrennter Manometer nicht mehr feststellen könnte, weil dies eine Differenzmethode (§ 13) wäre.

113. **Quecksilbermanometer.** Quecksilbermanometer bestehen aus einem U-förmigen Rohr (Fig. 87). Der eine Schenkel ist offen, der andere mit dem

zu untersuchenden Raum verbunden. Der Unterschied des Quecksilberstandes in beiden Schenkeln gibt die Spannung in cm Qu. Doch ist die Ablesung auf 0° C Quecksilbertemperatur zu reduzieren; da nämlich warmes Quecksilber leichter ist, so wird die Ablesung bei gleicher Spannung größer: nur bei 0° C ist 73,53 cm Qu. $= 1 \frac{kg}{qcm}$, nur bei 0° C ist 76 cm Qu. die Normalspannung. Entsprechend der Quecksilbertemperatur hat man die Ablesung um so viel Prozente zu verkleinern, wie Fig. 88 angibt: Diese stellt das Verhältnis der spezifischen Gewichte des Quecksilbers bei t^0 und bei 0° für verschiedene Temperaturen dar. Die Korrektion macht also meist $^1/_2$ % aus. Man ermittelt die Fadentemperatur, indem man ein Thermometer neben das Manometer hängt, die Kugel in halber Höhe der Quecksilbersäule — oder man schätzt sie einfach.

Etwas bequemer zum Ablesen sind einschenklige Quecksilbermanometer (Fig. 89): ein Glasrohr taucht unten in ein Gefäß, und ist oben offen. Die zu messende Spannung wird in das Gefäß geleitet, so daß sie auf den Quecksilberspiegel drückt und das Quecksilber in die Höhe treibt. Man hat hier nur an einer

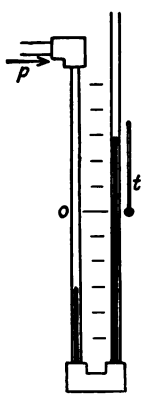


Fig. 87.

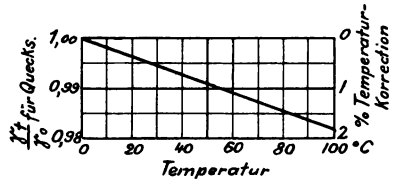


Fig. 88.
Gewicht des Quecksilbers bei wechselnder Temperatur.

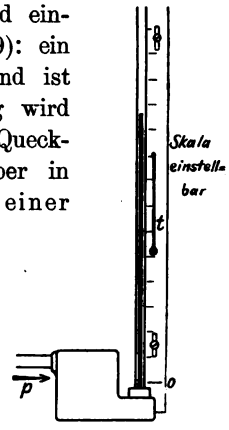


Fig. 89.

Skala abzulesen — bei der vorigen Anordnung waren die Ablesungen an zwei Säulen zu addieren. Die Änderungen des Quecksilberstandes im Gefäß sind nämlich gering. Um sie trotzdem zu berücksichtigen, macht man entweder die Skala, oder das Gefäß verschiebbar, oder aber man teilt die Skala nicht genau in Centimeter, sondern etwas enger. Die ersten beiden Anordnungen, bei denen man dann Nullpunkt der Skala und Quecksilberspiegel im Gefäß zur Übereinstimmung bringt, sind vorzuziehen. Bei der letzten nämlich ist das Einstellen des Nullpunktes durch Nachfüllen von Quecksilber sehr lästig.

Fig. 90 zeigt das Gefäßmanometer für Vakuum. Nicht unzweckmäßig dürfte es aber bisweilen sein, nicht Vakuum, sondern direkt den absoluten Druck in einem Kondensator und dergleichen zu bestimmen, indem man ein abgekürztes Barometer verwendet (Fig. 91): der eine Schenkel ist so

zugeschmolzen, daß keine Luft über dem Quecksilber bleibt, der andere mit dem Kondensator verbunden. Auskochen wie bei Barometern wäre eigentlich erforderlich. Als Normalinstrument zur Eichung anderer führt man das Quecksilbermanometer bis zu höheren Spannungen nach Fig. 92 aus. Das Gefäß ist aus Eisen, das Steigrohr aus starkwandigem Glasrohr, das in Abständen von etwa 2 m gestoßen wird. Der Stoß ist durch ein Gußeisenstück mit Lederstulpstopfbüchsen gesichert. Zum Ablesen muß man mittels Leiter am Steigrohr auf und ab klettern können; besser ist die Vorrichtung der Fig. 92 mit 2 Spiegeln

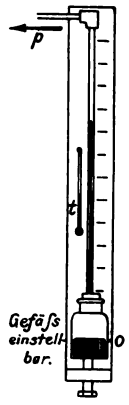


Fig. 90.

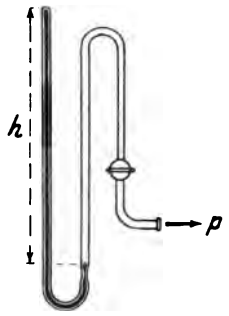


Fig. 91.

Vakuummeter für absoluten Druck.

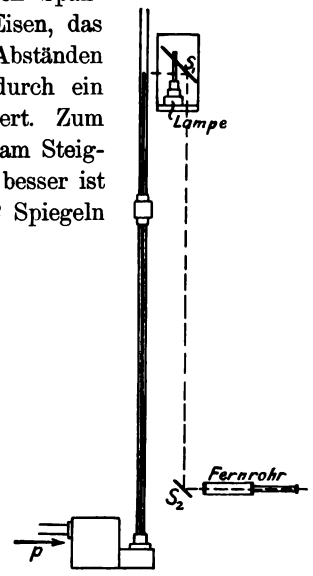


Fig. 92.

S_1 S_2 und Fernrohr. Spiegel S_1 und mit ihm eine Lampe zum Erhellen der Skala ist senkrecht beweglich: so kann man den Stand der Säule im Fernrohr ablesen.

114. **Wassermanometer.** Wassermanometer dienen zum Messen kleinerer Spannungen. Sie sind meist zweischenklig. Für ganz kleine Spannungen führt man sie wohl schräg aus, um eine weitere Skalenteilung zu erhalten (Fig. 93). In der Neigung weiter zu gehen als bis 1 : 5 oder 1:10 ist im allgemeinen falsch: die Unsicherheiten infolge mangelhafter Geradheit der Rohre, infolge ungenau wagerechter Aufstellung der Grundplatte, infolge von Kapillarität und von Hängen des Wassers an der Wandung, erhalten dann merklichen Einfluß auf das Resultat.

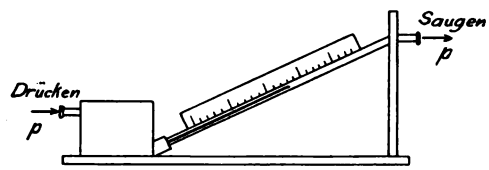


Fig. 93.

In Gasanstalten verwendet man wohl statt Wasser Petroleum zur Füllung: Teerteile verschmieren dann das Instrument nicht, sondern werden

gelöst. Die Teilung wird weiter als bei Wasserfüllung und muß auf cm Wassersäule empirisch oder durch Bestimmung des spezifischen Gewichtes des Petroleums reduziert werden. Zu beachten bleibt, daß die Angabe eines Wassermanometers kaum von der Temperatur abhängt (unterhalb 30°, vgl. Fig. 53), daß aber Petroleum erheblich leichter wird bei wachsender Temperatur (1 % Unterschied für 11°).

Fig. 94.

Nach Angaben von Lux werden Wassermanometer auch wie Fig. 94 und 95 einschenklig ausgeführt, in einem Stück aus Glas geblasen und die Teilung aufs Glas geätzt.

Überall wo kleine Spannungen zu messen sind, ist die Dichtheit der Zuleitung zum Instrument sehr wesentlich.

Gelegentlich wird die Messung mit Quecksilbersäule zu ungenau, die mit Wassersäule unbequem, weil die messende Wassersäule lang wird. Quecksilber ist zu schwer, Wasser zu leicht, dazwischen aber hat man keine Flüssigkeit, etwa vom spezifischen Gewicht 8 oder 10. In solchen Fällen kann man durch Anwendung zweier Flüssigkeiten Abhilfe schaffen und etwa das ebenfalls in dieser Form von Lux angegebene Manometer (Fig. 96) verwenden. Tritt Spannung in das Gefäß *A* ein, in dem Quecksilber steht, so hebt sich der Quecksilberspiegel im engen Rohr. Gleichzeitig aber wird auch die Wassersäule vergrößert, weil sich das enge Rohr nach oben hin noch einmal zusammenschnürt. Daher wird die zu messende Spannung teils durch Quecksilber, teils durch Wasser ausbalanziert, und die Skala, welche den Wasserstand ablesen läßt, wird weiter als bei Quecksilber, enger als bei Wasser allein. Man stellt sie rechnerisch oder besser empirisch, durch Eichen, fest.

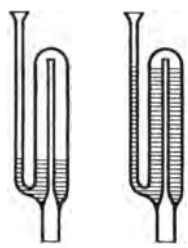


Fig. 95.

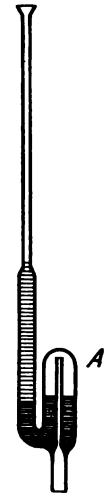


Fig. 96.

115. **Federmanometer.** Die Metall- oder Federmanometer sind Röhrenfeder- oder Plattenfederinstrumente.

In den Röhrenfedermanometern ist der wirksame Teil die Bourdonsche Röhrenfeder *F* (Fig. 97 und 98). Diese ist ein gebogenes Rohr, vom flachen Querschnitt *f*, in deren Inneres bei *a* die zu messende Spannung eintritt. Das andere Ende *b* der Röhrenfeder ist geschlossen. Die Spannung im Federinnern drückt nun gleich stark auf jedes Quadratcentimeter der Innenfläche. Da die Fläche aber, auf welche die Spannung wirkt, an der konvexen Seite der gekrümmten Feder größer ist als an der konkaven, so folgt, daß die Feder bei wachsender Spannung im Innern eine Tendenz erhält, sich gerade zu strecken. Dieser Tendenz wirkt die Elastizität des Federmaterials entgegen. Daher ändert die Feder ihre

Krümmung bei veränderlicher Spannung im Innern, ihr freies Ende *b* bewegt sich hin und her und betätigt den Zeiger, der vor einer Skala spielt.

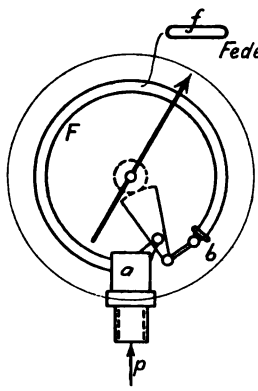


Fig. 97. Röhrenfedermanometer für niedere Spannung.

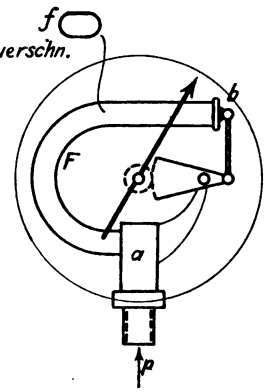


Fig. 98. Röhrenfedermanometer für hohe Spannung.

Man hat es in der Hand, Manometer bis zu den verschiedensten Spannungen herzustellen, indem man das Material, die Form, den Querschnitt und die Wandstärke der Feder verändert. Für kleine Spannungen macht man die Feder aus nachgiebiger Kupferlegierung, man macht sie möglichst lang gekrümmt, führt sie mit so geringer Wandstärke und so flach aus, daß das Trägheitsmoment ihres Querschnitts klein wird (Fig. 97 *f*). Für große Spannungen verwendet man aus massivem Stahl gebohrte Federn, denen man die Form Fig. 98 gibt und deren Querschnitt nach dem Ausbohren nur ein wenig elliptisch gemacht ist. Bei genügender Wandstärke sind solche Federn bis zu 2000 at brauchbar, was ja für hydraulische Zwecke nötig wird.

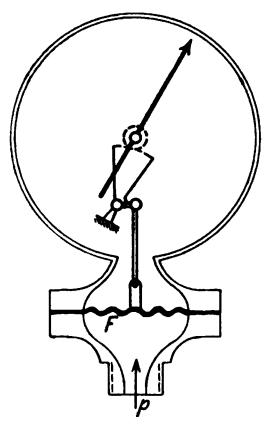


Fig. 99. Plattenfedermanometer.

Plattenfedermanometer haben etwa die Einrichtung der Fig. 99. Eine dünne gehärtete Stahlblechplatte *a* ist am Umfange eingeklemmt. Tritt höhere Spannung unter die Platte, so wird ihr Zentrum aufwärts gedrückt und der Zeiger bewegt. Um die Platte nachgiebiger zu machen, versieht man sie mit ringförmigen Wellen. Trotzdem bleibt der Ausschlag des Zentrums ein geringer, 1 bis 2 mm, und das ist der Nachteil der Plattenhinter der Röhrenfeder, deren freies Ende 6 bis 10 mm Ausschlag, von Null bis Höchstspannung, ausführt. Denn um eine genügende Zeigerbewegung zu erhalten, muß man beim Plattenfedermanometer stärkere Übersetzung zum Zeiger hin anwenden, und das vergrößert auch den toten Gang. Dafür ist die Plattenfeder, wegen ihrer geringen Eigenmasse, weniger empfindlich für Erschütterungen. Auf Lokomotiven z. B. verwendet man gerne Plattenfedermanometer, sonst zieht man meist Röhrenfedermanometer vor.

116. **Praktisches über Federmanometer.** Die Federmanometer sind die im praktischen Betriebe meist verwendeten. Bei ihrer Anwendung hat man zu beachten, daß man vor der Ablesung ans Gehäuse klopfen muß, um durch die Erschütterung die Reibung zu beseitigen. Tut man das, so zeigen die Instrumente bei steigender Spannung das gleiche an wie bei sinkender, ihre Empfindlichkeit ist dann sehr groß.

Die Federn, und zwar namentlich die Röhrenfedern, ändern ihre Elastizität, wenn sie warm werden; dadurch würde die Skala falsch und eine Neueichung nötig. Sind auch gute Fabrikate nicht sehr empfindlich in diesem Punkt, so soll man doch den Eintritt von Dampf in die Feder vermeiden, indem man einen Syphon vor das Manometer setzt. Fig. 100 stellt solche Syphons dar. In ihnen sammelt sich Wasser, und nur dieses tritt in die Röhrenfeder ein. Die Vorrichtung Fig. 101 dient demselben Zweck, außerdem aber schützt sie noch durch ihre feinen Bohrungen das Manometer vor schnellen Spannungsschwankungen, Stößen, die das Werk ruinieren würden. — Rosten im Innern ändert natürlich die Elastizität der Feder auch, weil die Wandstärke kleiner wird. Man hindert das Rosten der stählernen Federn von hydraulischen Manometern durch einen Asphaltüberzug, oder besser noch durch ein ganz feines Kupferblech. In die Röhrenfeder führt man ein dünnes Kupferrohr ein und bläht es durch Wasserdruck auf, so daß es sich dem Federrohr von innen anschmiegt.

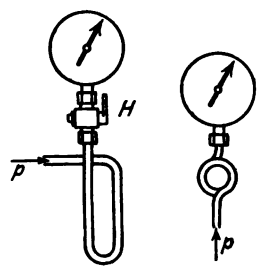


Fig. 100a und 100b.

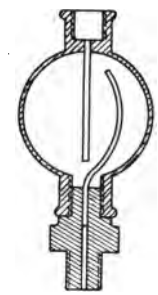


Fig. 101.

Zwischen Manometer und Syphon setzt man meist noch einen Hahn H, den man, wenn die zu messende Spannung periodisch schnell schwankt, so weit abdrosselt, daß man den Mittelwert sicher ablesen kann. Der Hahn wirkt als Flüssigkeitsbremse und vergrößert die Trägheit des Instrumentes (§ 22). Der Syphon Fig. 101 tut das gleiche.

Über Irrtümer, die durch falschen Anbau der Manometer entstehen, wird in § 121 einiges gesagt werden.

117. **Kolbenmanometer.** Kolbenmanometer benutzt man bei hohen Spannungen, bei denen Quecksilbersäulen nicht mehr zur Verfügung stehen, namentlich zum Eichen hydraulischer Federmanometer oder Indikatoren.

Ein Kolben (Fig. 102) von bekanntem Querschnitt wird mit Gewichtsstücken von bekanntem Gewicht belastet; dadurch entsteht in der Flüssigkeit unter dem Kolben — Öl oder Glyzerin — eine Spannung, welche durch die beiden bekannten Größen direkt gegeben ist. Man kann nun

einen Indikator, oder bei *M* ein Manometer aufsetzen und diese eichen, oder man kann ein bei *M* aufgesetztes Kontrollmanometer noch zur Kontrolle der aufgelegten Gewichte benutzen und hiernach den Indikator eichen. Durch Auflegen der Gewichte wird also die betreffende Spannung sowohl erzeugt als auch gemessen. Um die Reibung des Kolbens in seiner Führung unschädlich zu machen, bringt man die Gewichte zur Drehung („Spinnen"). Der Kolben hat 2 cm, nur bei hohen Spannungen kleineren Durchmesser; infolgedessen sind bedeutende Gewichte aufzulegen, die dann infolge ihrer Masse längere Zeit in Rotation bleiben.

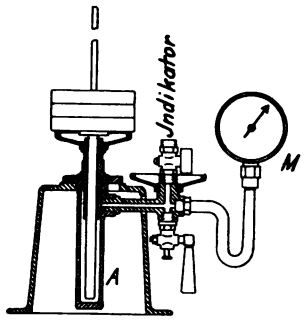


Fig. 102. Kolbenmanometer.

Mit zunehmender Spannung sinkt der Kolben mehr und mehr ein, weil so viel Flüssigkeit aus dem Zylinder in Indikator und Manometer übertritt, wie nötig ist, um den Raum unter dem Indikatorkolben, den Raum in der sich dehnenden Manometerfeder auszufüllen; auch muß jeder Verlust infolge von Undichtheit ein Herabsinken des Kolbens veranlassen. Dadurch entsteht zunächst ein Fehler in solchem Betrage, wie der Glyzerinsäule von der Höhe des Einsenkens entspricht; dieser Fehler ist indes nur bei ganz kleinen Spannungen von

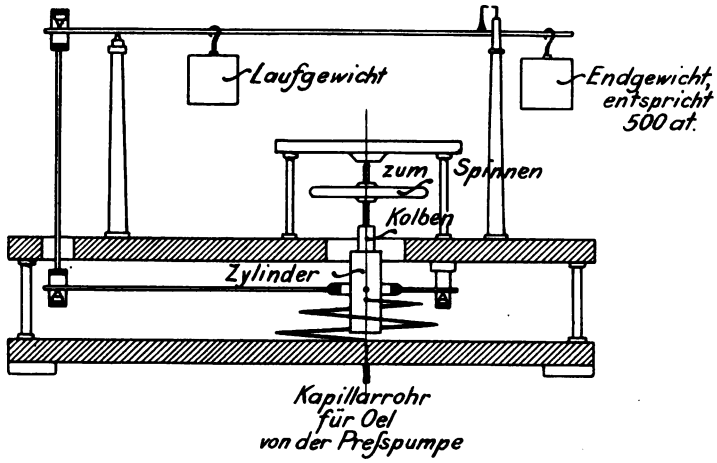


Fig. 103. Kolbenmanometer von Crosby.

einiger Bedeutung, für die sich das Kolbenmanometer ohnehin nicht eignet. Außerdem aber kommt man an jene Spannung, wo der Kolben unten aufstößt und keine Messung mehr möglich ist. Beides wird behoben, wenn

man eine Glyzerinpumpe mit dem Zylinder in Verbindung bringt und nach Bedarf Glyzerin nachpreßt, so daß der Kolben bei allen Spannungen in gleicher Höhe bleibt.

Der Apparat amerikanischen Ursprungs (Fig. 103) ist nur für solchen Betrieb mit einer Ölpumpe eingerichtet. Man erkennt, daß die Höhenlage des Kolbens fixiert ist und der Zylinder auf und ab geht, daß man aber dessen Abtrieb durch eine Laufgewichtswage mißt. In Rotation setzt man den Kolben, so daß man dabei die Gleichgewichtslage nicht stört.

Für kleine Spannungen ist das Kolbenmanometer, außer aus dem schon genannten Grunde, auch wegen der störenden Reibung schlecht zu brauchen; diese stört dann, selbst wenn der Kolben rotiert.

118. **Messung kleiner Spannungen: Zugmesser, Differentialmanometer.** Um sehr kleine Spannungsunterschiede zu messen, wie sie als Zug bei einer Feuerungsanlage oder bei Lüftungsanlagen vorkommen, reichen gewöhnliche Instrumente nicht aus. Manometer für sehr kleine Spannungen nennt man Zugmesser oder Differentialmanometer.

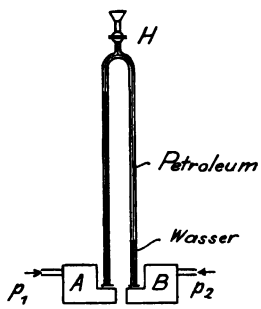


Fig. 104.

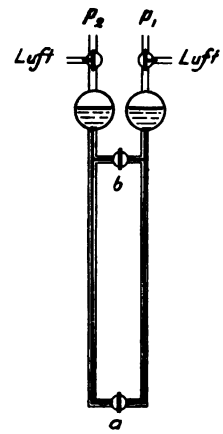


Fig. 105.

Man verwendet als Zugmesser Plattenfederinstrumente mit sehr dünnen und möglichst großen Platten in verschiedenen Anordnungen.

Wassermanometer lassen sehr kleine Spannungsdifferenzen von wenigen Millimetern Wassersäule nicht mehr genau messen: viel empfindlicher werden sie unter Verwendung zweier Flüssigkeiten von wenig verschiedenem spezifischem Gewicht. Eine solche Anordnung hatten wir beim Pitot-Rohr schon kennen gelernt (Fig. 45), wo wir den oberen Teil eines Differentialmanometers mit Petroleum statt Luft auffüllten, so daß nicht mehr das Gewicht einer Wassersäule, sondern die Differenz in den Gewichten einer Wasser- und einer Petroleumsäule die Messung bewirkte. Dort war eine Wasserspannung zu messen. Wenn es sich um Gasspannungen handelt, erhält man einen Apparat nach Fig. 104: der obere Teil ist etwa mit Petroleum gefüllt. Man darf natürlich die kleinen Niveaudifferenzen, die in den Gefäßen A und B entstehen, nicht vernachlässigen, sie sind bei der geringen zu messenden Spannung wohl von Einfluß. Die Teilung macht man dann empirisch. — Recht brauchbar mag auch eine Anordnung nach Fig. 105 sein: zwei Rohre, unten mit einer schweren, oben bis in die Erweiterungen hinein mit einer wenig leichteren Flüssigkeit gefüllt, sind unten und oben

durch absperrbare Querhähne verbunden. Die zu messende Spannungsdifferenz wird oben zugeführt, die Zuleitungen sind ebenfalls absperrbar und dafür Anschluß an die Außenluft möglich. Man öffnet zunächst Hahn *a*, schließt ihn, nachdem die zu messende Spannungsdifferenz einen Ausschlag bewirkt hat; verbindet oben mit der Außenluft und öffnet Hahn *b*, schließt ihn wieder, nachdem die Spiegel in den großen Gefäßen sich ausgeglichen haben. Nachdem wieder die Spannungsdifferenz oben angeschlossen ist, öffnet man kurze Zeit Hahn *a*, und so fort, bis man keine Veränderungen mehr wahrnimmt: dann steht in den weiten Gefäßen der Spiegel gleich, während die Scheide zwischen den Flüssigkeiten die Spannung anzeigt. Nie darf Hahn *a* und *b* zugleich offen sein. Als Flüssigkeiten wurden Olivenöl, spezifisches Gewicht 0,916, und Alkohol verwendet; des letzteren spezifisches Gewicht ist durch Wasserzusatz einstellbar. — Um die Grenze der Flüssigkeiten zu erkennen, färbt man eine derselben. Flüssigkeiten von nahezu gleichem spezifischen Gewicht geben keine gute Grenze. Die spezifischen Gewichte sind sorgfältig zu bestimmen. — Diese Methode ist nicht zu verwechseln mit der bei Fig. 96 besprochenen: dort kam das Verhältnis, hier die Differenz der spezifischen Gewichte zur Wirkung.

Man verwendet auch Wasser- oder Alkoholmanometer mit geneigtem Rohr. Bei Fig. 93 wurde schon besprochen, daß es im allgemeinen nicht tunlich ist, in der Neigung zu weit zu gehen. Doch hat Recknagel besonders für Lüftungsanlagen eine Methode angegeben, wie man bei sehr geneigtem, fast wagerechtem Steigrohr den Einfluß von Kapillarität und mangelhafter Geradheit des Rohres empirisch unschädlich machen kann. Man fügt nämlich (Fig. 93 auf S. 98) zum empirischen Eichen des Instrumentes ein bekanntes Volumen Alkohol zur Füllung hinzu. Kennt man den Querschnitt des Behälters und Steigrohres, so kann man berechnen, um wieviel der Spiegel in ersterem gestiegen ist, während man am Steigrohr abliest, um wieviel Skalenteile der Alkoholfaden vorgerückt ist. So hat man direkt den Wert des betreffenden Skalenteiles in Millimetern Alkoholsäule. Durch allmähliches Hinzufügen von mehr und mehr Alkohol eicht man die ganze Skala. Natürlich muß dabei das Instrument genau horizontal stehen und, soll die Eichung ein zweites Mal noch gelten, erst wieder ausgerichtet werden; es hat dazu eine Libelle. Die Neigung des Steigrohres ist bei dem Recknagelschen Instrument verstellbar. Man geht bis 1:100. Andere ähnliche Instrumente (Pneumometer von Krell) arbeiten mit einer Neigung bis 1:1000; mit zunehmender Neigung wird aber das Instrument auch subtiler zu behandeln. Alkohol hängt weniger am Rohr als Wasser.

Der Zugmesser von Lux ist — im Gegensatz zu den bisherigen statischen — ein dynamisches Instrument: in einem schwach konischen Glasrohr befindet sich ein kleiner Zelluloidkörper, die Fliege. Schließt man oben an das weitere Ende des Rohres die Leitung für die Zugmessung

an, während das untere Ende offen ist, so wird die Fliege in die Höhe genommen, und zwar wegen der Erweiterung um so höher, je stärker der Zug ist. Das Glasrohr ist mit Skala versehen.

119. **Eichung.** Der Eichung bedürfen nur Federmanometer und einige der beschriebenen Zugmesser. Quecksilber-, Wasser-, Kolbenmanometer indessen sind eo ipso richtig und daher als Normalinstrumente verwendbar, nachdem einmal das spezifische Gewicht des Quecksilbers mit 13,60 sehr genau bekannt oder nachdem der Kolbendurchmesser genau festgestellt ist. Erwähnt sei, daß man die Kolbenfläche eines Kolbenmanometers am sichersten feststellt, indem man es bei einer möglichst hohen Spannung mit einem Quecksilberinstrument vergleicht. Bei einschenkligen Druckmessern muß man die Richtigkeit der Skala unter Beachtung der Querschnittsverhältnisse feststellen — oder man eicht sie empirisch. Die Kapillarität verursacht keinen wesentlichen Fehler, wenn die Rohre über 5 mm lichte Weite haben. Die Temperatur bleibt natürlich immer zu beachten.

Die Eichung der Federmanometer ist einfach und geschieht durch Vergleich mit einem Normalinstrument. Als solche dienen Quecksilbersäulen oder Kolbenmanometer. Einen Unterschied zwischen warmer und kalter Eichung zu machen, wie wir das bei den Indikatoren nötig finden werden, ist bei Manometern überflüssig, da ja die Manometerfeder nie warm werden soll.

Als Normalinstrument bei der Eichung verwendet man auch wohl Kontrollmanometer, das sind selbst Federmanometer bester Bauart, die ihrerseits mit einem Quecksilberinstrument verglichen sind. Die Kontrollmanometer haben zwei völlig voneinander getrennte Werke. Solange die beiden Zeiger überein gehen, hat das Instrument noch nicht Schaden erlitten und ist zuverlässig.

Die einfachste Art und Weise, sich von der Unversehrtheit des Manometers — auch anderer Instrumente — zu überzeugen, ist übrigens die Nullpunktkontrolle: solange ein Instrument auf Null zurückgeht bei Außerbetriebsetzung, solange ist es nicht ganz in Unordnung. Der Anschlagstift, den die Manometer meist beim Nullpunkt haben, macht diese Kontrolle unmöglich. Solch Anschlagstift sollte deshalb fehlen, oder er sollte ein Stück jenseits des Nullpunktes sein, nur um große Schwingungen hintanzuhalten.

Beim Eichen sollte das Manometer die Lage haben — stehend, hängend oder dergleichen — wie später bei der Benutzung. Zu beachten ist außerdem das Folgende.

120. **Störende Wassersäulen.** Recht häufig werden Ablesungen an Manometern gefälscht durch Wassersäulen, die an den Federmanometern hängen, über der Quecksilbersäule stehen. Man hat entweder dafür zu sorgen, daß solche Wassersäule nicht vorhanden ist, oder dafür, daß sie

bei der Eichung und im Gebrauch gleichmäßig vorhanden ist, oder endlich man hat ihr durch eine Korrektion Rechnung zu tragen. Sind die Manometer einer Dampfmaschine am gemeinsamen Manometerbrett vereint, so führen Leitungen aus dünnem Kupferrohr dahin, die wohl um 2 m WS = 0,2 at die Ablesung fälschen können. Das ist selbst bei hohen Spannungen zu viel.

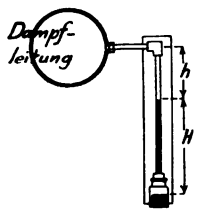


Fig. 106.

Man führe die Leitungen so, daß man sicher ist, wie weit Wasser in ihnen steht. Für ein Quecksilbervakuummeter am Auspuff einer Dampfmaschine (Fig. 106) ist es zweckmäßig, das Rohr nur einmal wagerecht zu knicken. Die Wassersäule h ist dann zur Quecksilbersäule H zuzuzählen: Vakuum $= \left[H + \frac{h}{13{,}6}\right]$ cm Qu.

121. **Messung von Wasserspannungen, von Spannungen bei fließendem Medium.** Bei Messung von Wasserspannungen ist es niemals gleichgültig, wo man die Spannung mißt. Bringt man das Manometer oben an einem Windkessel an, in den die Pumpe unten hineinspeist und aus dem auch unten das Wasser wieder entnommen wird, so liest man nicht die Spannung ab, gegen welche die Pumpe fördert: man muß die Höhe des Wassers im Windkessel noch hinzuzählen! Das macht oft $^1/_4$ at aus.

Andererseits ist es doch wieder richtig, das Manometer am Windkessel und nicht direkt an der Leitung anzubringen. Wird eine Rohrleitung angebohrt, so tritt leicht Saugen an der Bohrung ein, wenn das Wasser fließt. Das haben wir schon beim Pitot-Rohr, § 61, besprochen. Im Windkessel stagniert das Wasser, und jener Fehler ist unmöglich. — Übrigens ergeben sich ja auch theoretisch verschiedene Werte: in einer Rohrleitung wird, eben weil das Wasser fließt und kinetische Energie enthält, die potentielle Energie, d. h. die Spannung kleiner als in einem Windkessel gemessen. Der Unterschied ist bei der üblichen Wassergeschwindigkeit $w = 2{,}5 \frac{\text{m}}{\text{sec}}$ nur klein, nämlich $h = \frac{w^2}{2g} = \frac{6{,}2}{20} \sim \frac{1}{3}$ m WS. Das ist meist zu vernachlässigen, nötigenfalls aber hat man zu überlegen, was man denn messen will, ob die gesamte Energie im Wasser, oder nur die reine Spannung.

Die Spannung eines in der Rohrleitung fließenden Mediums ist immer schwierig zu messen: die Entnahme der Spannung ist die Schwierigkeit, weil an der Entnahmeöffnung Saugen eintritt. So fand Büchner (Z. V. D. I. 1904, S. 1101) Unterschiede von $^1/_4$ bis $^1/_3$ at, je nachdem er die Kanten der Entnahmeöffnung abrundete oder nicht; das war allerdings bei den hohen Dampfgeschwindigkeiten (400 m/sec), die in Turbinendüsen auftreten. Die Abrunduug wäre also nötig, ist aber meist nicht ausführbar.

122. **Dampfspannung und Temperatur.** Bei gesättigten Dämpfen kann man gelegentlich an die Stelle der Spannungsmessung mit Vorteil die Temperaturmessung treten lassen: bei kleinen Spannungen ist nämlich die Temperaturzunahme groß im Verhältnis zur Spannungszunahme. Zu beachten ist, daß ein Thermometer dann absolute Drucke mißt, die Manometer zeigten Überdruck an.

Spannung und Temperatur sind indes nur dann eindeutig voneinander abhängig, wenn es sich um reinen gesättigten Dampf handelt. Haben wir bei Kondensationsanlagen oder am Auspuff einer Kondensationsdampfmaschine ein Luft-Dampf-Gemisch, so ist der Ersatz der Spannungs- durch eine Temperaturmessung nicht immer zulässig.

X. Messung von Kraft, Drehmoment, Arbeit, Leistung.

123. **Definitionen.** Die Mechanik lehrt, daß wir eine Kraft nur an ihren Wirkungen erkennen können. Man definiert sie meist als die Ursache einer Bewegung. Es ist klar, daß wir sie dann auch nur aus ihren Wirkungen messen können.

Diese Wirkungen sind im allgemeinen dreierlei Art, ohne daß wir durch diese Einteilung prinzipielle Unterschiede hervorheben wollen. Auf ebenso vielfache Art werden wir sie dann auch messen können.

Eine Kraft kann eine Bewegung hervorbringen, d. h. einer Masse eine Beschleunigung erteilen. Das tut eine Lokomotive, wenn sie beim Anfahren den Zug in Bewegung setzt. Die Gesetze, nach denen die Erzeugung einer Bewegung vonstatten geht, geben die Beschleunigungsgleichung $P = m \cdot p$ und der Satz vom Antrieb $m \cdot w = P \cdot t$, worin P die Kraft, m die Masse, p die Beschleunigung, w die Geschwindigkeit und t die Zeit bedeutet. Zur Messung der Kraft sind diese Gleichungen selten zu verwenden. Wo man die Anlaufsverhältnisse einer Maschine (Fördermaschine, Lokomotive) untersucht, macht man wohl von ihnen Gebrauch. Doch sind zur Ermittlung der Kraft aus dem Verlauf der Geschwindigkeiten ausgedehnte rechnerische oder zeichnerische Operationen nötig. Wir gehen auf diese nicht ein.

Eine Kraft kann ferner dadurch kenntlich werden, daß sie die von einer oder mehreren anderen Kräften erstrebte Bewegung verhindert, sie ist dann mit diesen Kräften im Gleichgewicht. Kennt man die andere Kraft, so kann man sie nach den Lehren des Gleichgewichts zur Messung der ersten benutzen. Die Wage, die wir als Mittel zur Mengenmessung besprochen haben, ist eigentlich ein Kraftmesser. Die Schalenwage vergleicht irgend eine Kraft mit der Gravitationskraft des ausgleichenden Gewichtsstückes, die man kennt; die Federwage vergleicht eine beliebige Kraft mit der elastischen Kraft der Feder, die man ebenfalls kennt. Ist

eine Wage nicht für Mengenmessungen, sondern speziell zur Messung von Kräften eingerichtet, so nennt man sie Dynamometer.

Eine Kraft kann drittens dazu dienen, eine vorhandene Bewegung trotz entgegenstehender Widerstände aufrecht zu halten. Sie überwindet dann die Widerstände, und leistet dadurch eine Arbeit, die durch das Produkt: Größe der Kraft mal Weg ihres Angriffspunktes, gegeben ist. $L = P \cdot s$. Zur Messung einer Kraft kann diese Beziehung insofern dienen, als man aus dem Gesetz von der Erhaltung der Energie weiß, daß die Arbeit unverwüstlich, aber in die verschiedensten anderen Energieformen umsetzbar ist; solche Umsetzungen erfolgen nach festen Äquivalenzverhältnissen, darauf eben beruht die Messung. Man kann also die Arbeit nicht nur in mechanischer, sondern auch in elektrischer Form oder als Wärme messen, und dann rückwärts die Kraft berechnen.

Die in der Sekunde von einer Maschine gelieferte oder verbrauchte Arbeit nennt man ihre Leistung. Die Leistung ist also Kraft mal Weg in der Sekunde, also auch Kraft mal Geschwindigkeit: $N = \frac{P \cdot s}{t} = P \cdot w$. Da sich Leistungen nach den gleichen Äquivalenzverhältnissen in andere Energieformen umsetzen, kann man auch sie zur Ermittlung von Kräften verwenden.

Hat man etwa die elektrische Leistung eines Hebezeugmotors und die Hakengeschwindigkeit gemessen, so ergibt sich aus $N = P \cdot w$ die gehobene Last, freilich noch ohne Beachtung des Wirkungsgrades. Hat man die indizierte Leistung einer Lokomotive und die Fahrgeschwindigkeit des Zuges gemessen, so gibt die gleiche Formel die am Zughaken ausgeübte Kraft, wieder ohne Beachtung des Wirkungsgrades; doch ist es gleichgültig, ob der Zug bergauf oder bergab fuhr.

Solche Art der Messung ist indes der seltenere Fall: häufig ermittelt man umgekehrt aus der Last und der Hakengeschwindigkeit die Leistung eines Hebezeuges, aus Zugkraft und Fahrgeschwindigkeit die Leistung der Lokomotive. Der Zusammenhang bleibt aber der gleiche.

Die Messungen von Kraft, Arbeit und Leistung — zu ihnen wird sich sogleich noch das Drehmoment gesellen — gehen so ineinander über, daß wir sie gemeinsam besprechen müssen. Man mißt diejenige von den Größen, die gerade am bequemsten dazu ist, und berechnet die anderen.

124. **Definitionen für drehende Bewegung.** Für die drehende Bewegung tritt an die Stelle der Kraft das Drehmoment, das ist ein Kräftepaar, für dessen Wirksamkeit das Produkt aus Kraft und Arm maßgebend ist: $M_d = P \cdot l$. Geht die eine Kraft des Paares durch die Rotationsachse, wie es meist der Fall ist, so ist das von der anderen ausgeübte Drehmoment: Kraft mal Abstand des Angriffspunktes von der Drehachse, also wieder Drehmoment gleich Kraft mal Arm, $M_d = P \cdot l$. Man kann das Drehmoment auch als die Kraft reduziert auf den Arm Eins definieren.

Alles was wir über die Kraft und ihre Messung gesagt haben, gilt wörtlich vom Drehmoment, sobald es sich um eine drehende Bewegung handelt. Nur tritt die Winkelgeschwindigkeit ω oder die Tourenzahl n pro Minute an die Stelle der fortschreitenden Geschwindigkeit, der durchlaufene Winkel φ an die Stelle des Weges, und das Trägheitsmoment J an die Stelle der Masse. Der Satz vom Antrieb lautet für die drehende Bewegung daher $J \cdot \omega = M_d \cdot t$; das Beschleunigungsgesetz lautet $M_d = J \cdot \psi$, wo ψ die Winkelbeschleunigung ist. Die Leistung bei Überwindung eines Widerstandes ist $N = \frac{M_d \cdot \varphi}{t} = M_d \cdot \omega$; oder auch $N = \frac{M_d \cdot n}{9{,}55}$, wenn man mit n die minutliche Tourenzahl einführt und deshalb den Koeffizienten 9,55 benutzen muß $\left(\frac{60}{2\pi} = 9{,}55, \text{ siehe § 45}\right)$.

125. **Einheiten.** Als Einheit der Kraft haben wir im technischen Maßsystem das Kilogramm [kg], eines der Grundmaße. Die Einheit des Drehmomentes ist offenbar jenes Drehmoment, wo das Kilogramm am Arme von 1 m angreift, das Meterkilogramm [m·kg]. Man benutzt auch die kleinere Einheit: 1 cm·kg $= \frac{1}{100}$ [m·kg].

Die Einheit der Arbeit wäre diejenige Arbeit, die man aufwenden muß, um einen Widerstand von 1 kg über 1 m hin zu überwinden, etwa ein Kilogrammgewicht ein Meter hochzuheben. Die Einheit der Arbeit heißt daher ebenfalls Meterkilogramm [m·kg]. Benutzen wir die drehende Bewegung zur Bestimmung einer Arbeitseinheit, so kommen wir natürlich auf die gleiche: es ist diejenige Arbeit, die man aufwenden muß, will man eine Drehung um den Winkel Eins $\left(\frac{180^0}{\pi} \text{ nach § 45}\right)$ entgegen dem widerstehenden Drehmoment von 1 m·kg zustande bringen. Die Einheit ist also 1 m·kg · 1 = 1 [m·kg], denn der Winkel ist eine unbenannte Zahl. Auf gebräuchlichere Arbeitseinheiten kommen wir unten.

Die Einheit der Leistung im technischen Maßsystem wird geliefert, wenn in jeder Sekunde die Arbeit von 1 [m·kg] geliefert wird. Diese Einheit $1\left[\frac{\text{m·kg}}{\text{sec}}\right]$ ist nicht die übliche. Man rechnet im Maschinenbau nach Pferdestärken, und zwar ist 1 PS $= 75\left[\frac{\text{m·kg}}{\text{sec}}\right]$; sie ist 75 mal so groß wie die Einheit des technischen Maßsystems. — Die Elektrotechnik ist, vom physikalischen c. g. s-System ausgehend, auf das Watt als Leistungseinheit gekommen, das ist das Produkt aus der Spannung 1 Volt und der Stromstärke 1 Ampere. Gebräuchlicher noch ist das Kilowatt: 1 KW = 1000 Watt = 1000 Voltampere. Beide Leistungseinheiten, Kilowatt und Pferdestärke, stehen in einem gewissen festen Verhältnis zueinander, das experimentell wie folgt festgestellt ist: Fließt 1 Ampere im Leiter von 1 Ohm Widerstand, also bei 1 Volt Spannungsabfall, so entstehen 0,24 Wärme-

einheiten in der Sekunde (kalorimetrische Messung): 1 Watt $= 0{,}24\,\frac{\text{WE}}{\text{sec}}$. Andererseits ist bekanntlich $\frac{1}{424}$ WE $= 1$ m·kg, also 1 PS $= 75\,\frac{\text{m·kg}}{\text{sec}}$ $= \frac{75}{424}\,\frac{\text{WE}}{\text{sec}}$. Daraus folgt 1 PS $= \frac{75}{424 \cdot 0{,}24} = 736$ Watt. Das Kilowatt ist also um etwa ein Drittel größer als die Pferdestärke, diese um rund ein Viertel kleiner als das Kilowatt.

Rückwärtsgehend hat man aus diesen Leistungseinheiten durch Multiplizieren mit der Zeitdauer, während welcher die Leistung geliefert wurde, Arbeitseinheiten gebildet, die mehr gebraucht werden als das Meterkilogramm. Wird 1 PS eine Stunde lang geleistet, so ist die gelieferte Arbeit 1 PS·Stde; wird 1 KW eine Stunde lang geleistet, so ist die gelieferte Arbeit 1 KW·Stde. Es ist offenbar

$$1\ \text{PS·Stde} = \left(75\,\frac{\text{m·kg}}{\text{sec}}\right) \cdot (3600\ \text{sec}) = 75 \cdot 3600\ \text{m·kg} = 270000\ [\text{m·kg}],$$

also

$$1\ \text{KW·Stde} = \frac{1000}{736} \cdot 270000 = 367000\ [\text{m·kg}].$$

Endlich kann man noch die Wärmeeinheit als Arbeitseinheit ansehen, d. i. jene Wärmemenge, welche 1 kg Wasser um 1^0 erwärmt. Bekanntlich ist 1 WE $= 424$ [m·kg]: diese Zahl ist der den Tabellenwerken meist zugrunde gelegte Wert, nach den neuesten Forschungen ist 428 wahrscheinlicher. Die reziproke Zahl $\frac{1}{424}$ pflegt man mit dem Buchstaben A zu bezeichnen. Es ist offenbar auch 1 WE $= 424 \cdot \frac{1}{270000} = \frac{1}{637}$ PS·Stde, oder, wenn wir durch Division mit der Stunde auf Leistungseinheiten überspringen: 1 PS $= 637\,\frac{\text{WE}}{\text{Stde}}$. Die Wärmeeinheit ist also eine viel größere Einheit, als man, nach dem Gefühl urteilend, meint.

Im englischen Maßsystem ist die Arbeitseinheit das Fußpfund; es ist 1 m·kg $= 7{,}233$ Fußpfund. Die englische Pferdestärke (HP) ist 1 HP $= 550\,\frac{\text{Fs·Pfd}}{\text{sec}}$; es ist 1 PS $= 0{,}986$ HP.

126. **Übersichtliche Zusammenstellung.** Dadurch, daß wir mit Einführung der Pferdestärke, des Kilowatts, der Wärmeeinheit und schon vorher durch Einführung der minutlichen Umlaufszahl als Einheit der Winkelgeschwindigkeit das technische Maßsystem durchbrochen haben, ist ein ziemliches Gewirr von Begriffen entstanden. Wir stellen die Ergebnisse der letzten Paragraphen kurz zusammen.

Bezeichnung: Kraft P, Hebelarm l, Drehmoment M_d, Arbeit L, Leistung N, Weg s, Geschwindigkeit w, minutliche Umlaufzahl n.

Drehmoment: Einheit: 1 m·kg; $M_d = P^{kg} \cdot l^m$; $M_d^{m.kg} = 716 \frac{N^{PS}}{n}$.

Arbeit: Einheiten: 1 m·kg; 1 WE = 424 m·kg;

1 PS·Stde = 270000 m·kg = 637 WE;

1 KW·Stde = 367000 m·kg = $\frac{1000}{736}$ PS·Stde.

Leistung:

Einheiten: 1 PS = 75 $\frac{\text{m·kg}}{\text{sec}}$ = 637 $\frac{\text{WE}}{\text{Stde}}$ = 736 Watt = 0,736 KW;

1 KW = 1000 Watt = 1000 Voltampere = $\frac{1000}{736}$ PS.

Fortschreitende Bewegung: $N^{PS} = \frac{1}{75} \cdot P^{kg} \cdot w^{m/sec}$.

Drehende Bewegung: $N^{PS} = \frac{M_d^{m.kg} \cdot n^{T.\,p.\,M.}}{716}$.

127. **Übersicht der Meßmethoden.** Die Messung von Kräften geschieht mit Dynamometern im engeren Sinne dieser Bezeichnung. In diesen setzt man der zu messenden Kraft eine bekannte entgegen, die im Gleichgewichtszustand ihr gleich sein muß. Die Wage ist ein Dynamometer zum Messen von Schwerkräften. Sonst verwendet man in den Dynamometern als widerstehende, messende Kraft entweder die Elastizität einer Feder — Federdynamometer — oder die Spannung einer Flüssigkeit — Flüssigkeitsdynamometer.

Die Messung des von einer im Gang befindlichen Kraftmaschine gelieferten Drehmomentes kann durch Abbremsen geschehen. Die Bremsdynamometer messen das Drehmoment, indem sie die ihm entsprechende Energie vernichten — in Wärme umsetzen. Die kraftverbrauchenden Maschinen, wie Pumpen, Hebemaschinen, Werkzeugmaschinen, kann man nicht abbremsen, weil das zu messende Drehmoment sie ja treiben soll, also nicht vernichtet werden darf. Man kommt entweder auf Umwegen zum Ziel, oder man verwendet die freilich unbequemen Transmissionsdynamometer, die das Drehmoment messen, während es durch sie hindurchgeht und die auch für Kraftmaschinen angewendet werden können, wenn man deren Energie nicht vernichten will. — Will man die Leistung der Maschine kennen, so muß man außer dem Drehmoment noch die minutliche Umlaufzahl feststellen.

Der Indikator dient bei Kolbenmaschinen dazu, den Spannungsverlauf im Zylinder während eines Hubes und damit die geleistete Arbeit graphisch darzustellen. Aus seinem Diagramm ergibt sich die bei dem Hube gewonnene oder verbrauchte Arbeit. Will man die Leistung der Maschine kennen, so hat man noch festzustellen, wieviel Hübe in der Minute gemacht werden, wie oft also jene Arbeit umgesetzt wird.

Die Leistung einer Maschine direkt zu bestimmen. ist man dann in der Lage, wenn man sie in elektrischer Form messen kann. Dazu setzt man

die Leistung einer Kraftmaschine in einer Dynamomaschine in Elektrizität um, dazu treibt man eine Pumpe oder dergleichen elektrisch an. Man will die an der Welle des Dynamo oder des Elektromotors vorhandene Energie ermitteln; diese unterscheidet sich von der in elektrischer Form abgelesenen um die Verluste in Dynamo oder Motor. Man muß also den Wirkungsgrad der elektrischen Maschine kennen.

128. **Indizierte und effektive Leistung.** Der Indikator stellt bei der Dampfmaschine die vom Dampf auf den Kolben übertragene Leistung fest; eine auf das Schwungrad gesetzte Bremse würde die an der Welle verfügbare Leistung messen. Letztere ist um so viel geringer, wie die Reibung und andere Verlustquellen ausmachen. Man nennt nun die durch Indikator ermittelte die indizierte Leistung, die an der Welle verfügbare heißt die effektive oder auch die Bremsleistung der Dampfmaschine.

Der Indikator stellt bei einer Kolbenpumpe die vom Kolben auf das Wasser übertragene Leistung fest; der treibenden Welle muß man eine um die Reibungsverluste größere Leistung zuführen, die man mittels Transmissionsdynamometer messen kann. Die erstere heißt wieder die indizierte Leistung der Pumpe, für die der Welle zuzuführende Leistung hat man keinen festen Ausdruck: man nennt sie wohl Riemen- oder Wellen- oder Antriebleistung. Unter effektiver Leistung der Pumpe aber versteht man die in Form von gehobenem Wasser verfügbare Leistung, das ist das Produkt aus sekundlicher Wassermenge in die Förderhöhe (geteilt durch 75, will man auf PS kommen).

Bei rein rotierenden Maschinen, wie Turbinen und Zentrifugalpumpen, gibt es keine indizierte Leistung. Bei Werkzeugmaschinen kann man nicht von einer effektiven sprechen. Im übrigen aber wird man die an Beispielen erklärten Begriffe leicht auf andere Fälle übertragen können.

129. **Dynamometer für Kraftmessung.** Apparate zur Messung von Kräften oder Drehmomenten heißen Dynamometer. Die Hebelwage ist ein Dynamometer, sie mißt die Schwerkraft von Körpern. Meist betrachtet man aber die Wage als zum Messen von Stoffmengen dienend. Dann versteht man unter Dynamometern Apparate, deren Wirkung nicht an die senkrechte Richtung der Kraft gebunden ist. Doch werden wir die Brückenwage später beim Pronyschen Zaum richtig als Kraftmesser verwendet finden.

Ein eigentliches Dynamometer ist die Federwage, deren Wirksamkeit zu beschreiben wohl überflüssig ist. Bei dem Dynamometer Fig. 107, das in der Landwirtschaft zur Bestimmung der Zugkraft von Pferden dient, sind sanft gebogene Federn der wirksame Teil. Die Eigenschaften der Federwagen und ihre Eichung sind in Kap. III eingehend besprochen.

Hydraulische Dynamometer sind eine Umkehrung der Kolbenmanometer. Die zu messende Kraft wirkt auf einen Kolben und erzeugt in der Flüssigkeit unter dem Kolben eine Spannung, welche ein Maß für die

Größe der Kraft ist, sobald man die Kolbenfläche kennt. Das Manometer wird direkt in Kilogramm geteilt, nicht erst in Atmosphären.

Dynamometer dieser Art dienen häufig zur Bestimmung der von Lokomotiven ausgeübten Zugkraft, sie sind in einem besonderen Dynamo-

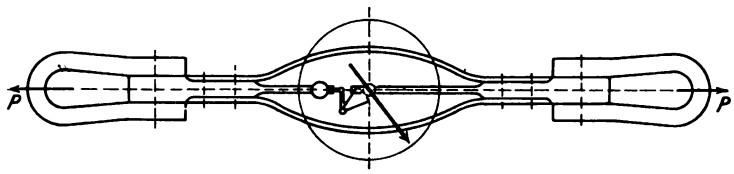


Fig. 107. Dynamometer.

meterwagen an Stelle des Zughakens gesetzt. Oft sind sie registierend. Außerdem ist das Materialprüfwesen das Hauptanwendungsgebiet der Dynamometer.

130. **Rotationsdynamometer: Wiegedynamometer.** Bei Messung von Drehmomenten handelt es sich meist um ein rotierendes System: das von einer Maschine zum Antrieb geforderte Drehmoment ist zu bestimmen. Bei einer zunächst zu besprechenden Klasse von Rotationsdynamometern geschieht die Messung durch eine Art von Wagevorrichtung, und zwar durch eine Hebelwage, eine Federwage oder eine hydraulische Wage. Die Schwierigkeit besteht dann nicht in der Konstruktion des messenden Apparates, als vielmehr darin, dessen Angaben trotz der Rotation des ganzen Systems nach außen hin kenntlich zu machen.

Am einfachsten ist diese Aufgabe bei einer hydraulischen Einrichtung zu lösen. Einer von den beiden Riemenscheiben (Fig. 108) soll die Energie durch Riemen zugeführt, von der anderen soll sie wieder entnommen werden, das Dynamometer wird also als messender Apparat zwischen die beiden Riemen geschaltet. Die Übertragung des Drehmomentes kann, wie man erkennen wird, nur durch die beiden Zylinder mit Kolben erfolgen. Die darin enthaltene Flüssigkeit, meist Öl, empfängt eine Spannung, die sich durch die hohle Welle fortpflanzt und an ein Manometer tritt, wo sie abgelesen werden kann. Eine Stopfbüchse läßt zu, daß das Manometer nicht mit rotiert. Man übersieht, daß das übertragene Drehmoment proportional der Spannung ist.

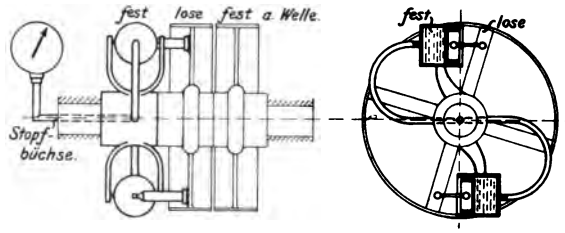


Fig. 108.

Ein Federdynamometer stellt Fig. 109 dar. Das Drehmoment soll von der einen Welle auf die andere gleichachsige übertragen und dabei gemessen werden. Die Übertragung kann nur durch die Federn F_1 bis F_4 hindurch geschehen; deren Zusammendrückung, also die Verdrehung der Scheiben S_1 und S_2 gegeneinander, ist ein Maß des übertragenen Drehmomentes. Diese Relativverdrehung wird nach außen kenntlich gemacht durch die Schlitze s_1 und s_2, durch welche hindurch das Auge des Beobachters eine Lampe sieht: der Lichtschein wandert bei steigendem Drehmoment von innen nach außen. Man kann eine feststehende Skala vor dem Instrument anbringen.

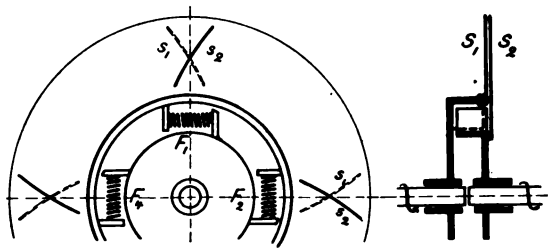


Fig. 109.

Die bisher beschriebenen Rotationsdynamometer erfahren wenig Anwendung. Sie wurden zur Erklärung des Prinzips angeführt. Die Zentrifugalkraft übt auf die Feder, auf das Öl einen mit der Tourenzahl wechselnden Einfluß. Viel verwendet wird hingegen das Fischingersche Dynamometer; es beruht auf dem Prinzip der Hebelwage (Fig. 110 u. 111).

Von den beiden Riemenscheiben S_1 und S_2, Fig. 111, dient eine zum

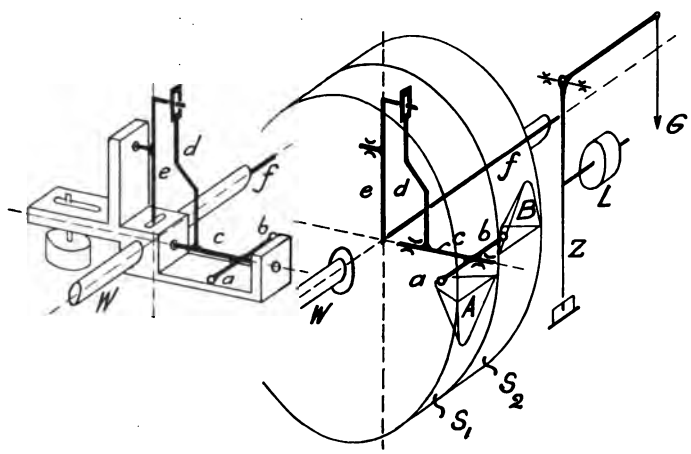


Fig. 110. Fig. 111. Fischinger-Dynamometer.

Antrieb, eine zum Abtrieb durch Riemen. Beim Übergang von der einen Scheibe auf die andere soll das Drehmoment gemessen werden. Die Übertragung des Drehmomentes geschieht durch den Hebel ab, der sich gegen

Knaggen A und B in den beiden Riemenscheiben stützt, von der einen mitgenommen wird und seinerseits die andere mitnimmt. Dabei entsteht in der Welle c ein Drehmoment proportional dem zu messenden, und Hebel d macht einen kleinen Ausschlag bis an eine Hubbegrenzung. Dadurch wird unter Vermittlung des zweiarmigen Hebels e die Stange f in der hohlen Welle nach außen gestoßen. Man legt nun Gewichte bei G auf eine Wagschale, bis Stange f wieder einwärts gepreßt wird, und dadurch das ganze Hebelsystem — das übrigens mitsamt den Riemenscheiben um Welle W rotiert — in seine Mittellage zurückkehrt. Dann zeigt Zunge Z wieder auf die Nullmarke. Die aufgelegten Gewichte sind nun ein Maß für das übertragene Drehmoment, und zwar wird durch Ausprobieren die Wagschale so angebracht, daß 1 kg auf der Wagschale einer Umfangskraft von etwa 10 kg an den beiden (gleich großen) Riemenscheiben entspricht: Übersetzung 1 : 10.

Fig. 110 läßt erkennen, wie die Wägehebel $a\,b\,c\,d$ einerseits, e andererseits in einem Armkreuz gelagert sind. Das Armkreuz ist fest auf der Welle W, die beiden Riemenscheiben sind lose darauf.

Mit Laufgewicht L bringt man zunächst im Leerlauf den Zeiger zum Einspielen (Austarieren); das muß bei verschiedenen Umlaufzahlen immer neu gemacht werden, vgl. § 133.

131. **Getriebedynamometer.** Wenn wir die bisherigen Rotationsdynamometer, die auf dem Prinzip der Wage beruhen, als Wiegedynamometer ansprechen können, so kommen wir nun zu einer Gruppe, die wir als Getriebedynamometer bezeichnen können. Sie untersuchen die Kräfte in einem Zahnrad- oder Riementrieb und messen dadurch das durch dieses Getriebe übertragene Drehmoment.

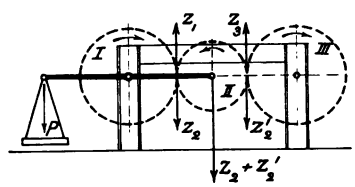


Fig. 112.

Die wichtigsten unter ihnen sind die Zahndruckdynamometer. Fig. 112 (Kittler) diene namentlich dazu, ihr Prinzip zu erläutern. Die Zahnräder I und III sind im Gestell, II ist in einem Wagebalken gelagert, im Leerlauf ist der Wagebalken austariert. Geht nun ein Drehmoment von I nach III durch II hindurch, und erfolgt die Rotation der Räder im Sinn der Pfeile, so entstehen an den Zähnen die Zahndrucke Z_1 und Z_2, Z_2' und Z_3 in der gezeichneten Richtung. Am treibenden Rad I muß ja der Zahndruck Z_1 der Bewegung entgegen wirken, er stellt den Widerstand dar, den das Rad erfährt; am getriebenen Rad II wirkt Z_2 in Richtung der Rotation, er treibt ja das Rad an. Beim Räderpaar II—III ist II das treibende, III das getriebene, also muß an II, der Bewegung entgegen, Z_2' abwärts wirksam sein. Am Rad II greifen also beide Kräfte, Z_2 und Z_2', abwärts an, die Summe $Z_2 + Z_2'$ kann man also bei P messen. Übrigens

ist auch noch $Z_2 = Z_2' = Z$; bei P messen wir also $Z_2 + Z_2' = 2\,Z$. Ist r_1 der Radius des Rades I und n_1 seine Tourenzahl, so ist die durch das Dynamometer übertragene Leistung in PS: $N = \frac{2\,\pi\,r_1\,n_1\,Z}{60 \cdot 75}$. — Die Teilkreise der Räder I—II haben nur die richtige Lage zueinander, wenn der Wagearm ausgeglichen ist. Man muß deshalb Evolventenverzahnung anwenden. Das Dynamometer läuft trotzdem meist klapprig.

Viel wertvoller ist das Zahndruckdynamometer von Amsler-Laffon (Fig. 113). Von Kurbel oder Riemenscheibe aus wird Zahnrad I angetrieben und das Drehmoment durch II und III hindurch auf Zahnrad IV und damit auf die Abtriebwelle übertragen. Dabei entstehen an den Zahnrädern die Zahndrucke Z_1 bis Z_4, ähnlich wie im vorigen Fall. Wir haben nun die Zahnräder II—III zu betrachten, welche starr verbunden sind. Auf sie wirken die erwähnten Zahndrucke Z_2 und Z_3. Dem Zahndruck

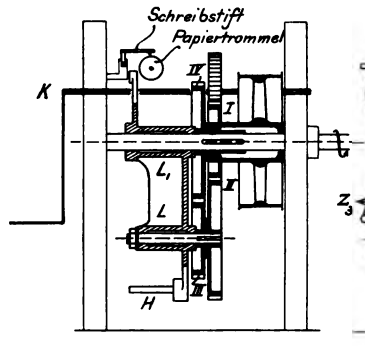


Fig. 113. Dynamometer von Amsler-Laffon.

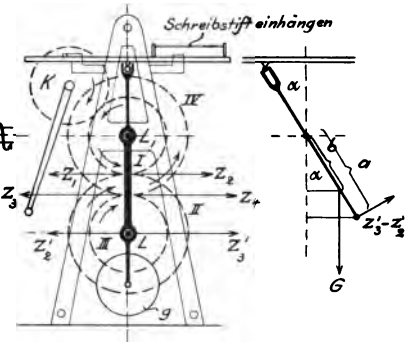


Fig. 114.

an einem Zahnrade entspricht nun stets eine Lagerreaktion in gleicher Größe von entgegengesetzter Richtung: Zahndruck und Lagerreaktion geben ja zusammen das Kräftepaar, welches erst die Drehung bewirkt. Also müssen am Lager L die Reaktionen $Z_2' = Z_2$ und $Z_3' = Z_3$ auftreten. Nun gilt für das starre Gebilde II—III die Momentengleichung $Z_2 \cdot r_2 = Z_3 \cdot r_3$, wo r die betreffenden Teilkreisradien. Da r_2 von r_3 verschieden, so ist auch Z_2 von Z_3, daher auch Z_2' von Z_3' verschieden. Da nun Lager L beweglich ist, es befindet sich in einem bei L_1 aufgehängten Gehänge, so wird dieses in der rechten Figur schwarze, in der linken schraffierte Gehänge aus seiner Mittellage treten, so lange bis in schräger Lage sein Eigengewicht G der Differenz $Z_3' - Z_2'$ das Gleichgewicht hält. Das tritt ein, wenn in Fig. 114 ist $G \cdot b \cdot \sin\alpha = (Z_3' - Z_2') \cdot a$. Also ist $\sin\alpha = \text{konst.}\,(Z_3' - Z_2')$: der Sinus des Neigungswinkels ist der Differenz $Z_3' - Z_2'$ proportional. Nun ist noch, wegen $Z_2' r_2 = Z_3' r_3$, auch $Z_3' - Z_2'$

$= \frac{r_2 - r_3}{r_2} \cdot Z_3 =$ konst. $\cdot Z_3 =$ konst. $\times$ übertragenes Drehmoment. Also sind auch die übertragenen Momente dem $\sin\alpha$ proportional.

Bei seiner Bewegung verschiebt das Gehänge $L L_1$ ein Lineal mit Skala, die vor einer festen Marke spielt. Man wird übersehen können, daß bei der gewählten Anordnung auch die Ausschläge der Skala dem $\sin\alpha$ proportional werden: also sind die Skalenausschläge direkt dem Drehmoment proportional. Die Skalenteilung kann also gleichmäßig sein.

An demselben Lineal ist auch ein Schreibstift befestigt, der auf rotierender Papiertrommel den Verlauf eines wechselnden Drehmomentes verzeichnet; durch Planimetrieren des entstehenden Diagrammes und Ziehen der Ausgleichlinie kann man das mittlere Moment finden. Die Papiertrommel wird von einer der Wellen aus angetrieben.

Bringt man auf einen Haken H des Gehänges Zusatzgewicht g, so ändert sich der Wert eines Skalenteiles, der übrigens durch Versuch zu bestimmen ist (vgl. § 133). Gehängegewicht und Zusatzgewichte sind so bemessen, daß dem Drehmoment 1, 2 ... mkg an der Abtriebwelle eine glatte Zahl der Skala entspricht.

Riemendynamometer werden kaum praktisch verwendet; in der Literatur finden sich viele beschrieben.

Getriebedynamometer verbrauchen Arbeit und sind daher der Abnutzung unterworfen, die vorher besprochenen Wiegedynamometer verbrauchen nur in den Lagern Arbeit und sind daher der Abnutzung weniger unterworfen.

132. **Torsionsdynamometer.** Man hat auch die Torsion einer Welle direkt zur Bestimmung des hindurchgehenden Drehmomentes benutzt. So wurde (Fig. 115) eine Zentrifugalpumpe von einem Elektromotor durch eine nicht zu kurze Welle W hindurch angetrieben. Sie tordierte sich entsprechend dem durchgehenden Drehmoment. Das lose darübergehende, nur bei a befestigte Messingrohr R tordierte sich nicht. Infolgedessen mußten sich die Scheiben S_1 und S_2 gegeneinander verdrehen. S_1 war mit einer Wachsschicht versehen; in diese machte eine an S_2 sitzende Nadel einen Eindruck, sobald man sie, mechanisch oder durch Elektromagnet, dagegen drückte. Das mußte natürlich während der Rotation möglich sein. Nachdem man dann die Maschinen angehalten hatte, klemmte man die Welle bei a völlig fest und brachte bei b mittels aufgeklemmten Hebels ein solches Drehmoment an, daß die Nadel wieder dem Wachseindruck gegenüberstand, den sie vorher gemacht hatte. Dieses Drehmoment der Ruhe konnte man nun direkt messen: es war Kraft mal Hebelarm. Dieses umständliche Verfahren gab recht genaue Resultate bei gleichmäßigem Drehmoment. (Engineering, 27. 11. 03.)

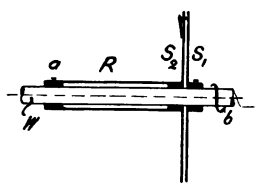


Fig. 115.

Man vergleiche auch das Frahmsche Verfahren zur Untersuchung von Wellenschwingungen, Z. V. D. I. 1902.

133. **Justierung; Eichung.** Vor Benutzung eines Rotationsdynamometers hat man seine Eigenreibung zu bestimmen oder zu eliminieren. Am deutlichsten tritt das beim Amsler-Dynamometer hervor. Zum Messen dient der Ausschlag des Gehänges LL_1, Fig. 113. Dabei mißt man nicht das Drehmoment in der Abtriebwelle, das man doch kennen will, sondern jenes in den Übertragungsrädern *II—III* des Gehänges. Dieses unterscheidet sich vom gesuchten Drehmoment (abgesehen vom Übersetzungsverhältnis der Zahnräder) um soviel, wie die Reibung in der Zahnräderübertragung ausmacht. Diese Reibung wirkt der Bewegung entgegen, ihr Sinn wechselt also mit der Drehrichtung des Dynamometers. Schon wenn die Abtriebwelle ganz leer läuft, wird sich daher ein Ausschlag der Skala zeigen. Dieses Drehmoment der Eigenreibung muß man bestimmen und von jeder späteren Ablesung als Korrektion abziehen; oder man muß durch Anbringen passender Gewichte den Leerlaufausschlag ausgleichen, so daß das leer laufende Dynamometer auf Null einspielt. Daß das durch Reibung verloren gehende Moment bei allen Lasten das gleiche ist, ist eine nur annähernd zutreffende Annahme. Bei der Justierung soll das Dynamometer mit der Tourenzahl der späteren Benutzung laufen. Man hat sie vor jeder Benutzung zu wiederholen, weil die Reibung veränderlich ist. — Beim Fischinger-Dynamometer dient das Laufgewicht *L*, Fig. 111, zur Justierung, die übrigens ebenso geschieht: das laufende Dynamometer muß einspielen.

Nach dieser Justierung ist es nützlich, gelegentlich noch eine Eichung des Dynamometers auszuführen, indem man die Abtriebwelle abbremst und zusieht, welchem Drehmoment ein Skalenteil des Amsler-, ein gewisses Schalengewicht des Fischinger-Dynamometers entspricht.

134. **Umgehung der Dynamometer.** Wir beschließen hiermit die Besprechung der Rotationsdynamometer. Ihre Bedeutung ist geringer, als man nach der Literatur annehmen sollte: sie bieten ein besonders gutes Feld für die Erfindertätigkeit, weil sie Gelegenheit zu interessanten, aber selten praktisch brauchbaren Konstruktionen geben. Unentbehrlich sind sie eigentlich nur, wenn es sich um die — meist graphische — Feststellung schnell wechselnder Kräfte handelt, etwa um bei einer Hobelmaschine die für Hin- und Rückgang des Tisches erforderlichen Momentanleistungen zu vereinzeln oder um festzustellen, wie die vom Menschen an einer Kurbel ausgeübte Kraft periodisch schwankt. Wo es sich nur um Feststellung eines ganz oder doch annähernd konstanten Drehmomentes handelt, da kommt man bequemer auf Umwegen zum Ziel.

Der Umweg besteht meist darin, daß man eine Dampf- oder andere Kraftmaschine einmal mit, einmal ohne zu untersuchende Maschine laufen läßt. Der Unterschied in den beiden indizierten Leistungen oder, bei Verwendung eines Elektromotors, in den beiden elektrischen Leistungen ist

dann der Kraftbedarf der zu untersuchenden Maschine. Voraussetzung dabei ist, daß die Verluste in der treibenden Maschine durch Reibung und dergleichen bei verschiedenen Belastungen die gleichen bleiben; das trifft natürlich nur annähernd zu. — Die unten zu besprechende elektrische Leistungsbestimmung dient dem gleichen Zweck.

Viel wichtiger als die Rotationsdynamometer sind die Bremsdynamometer.

135. **Bremsdynamometer: Zaum.** Die einfachste und älteste Form eines Bremsdynamometers ist der Pronysche Zaum (Fig. 116). Auf eine Riemenscheibe oder auf ein Schwungrad wird der hölzerne Hebel ab gelegt und durch das eiserne Band cde und die Schrauben fg nach Bedarf angepreßt. Dadurch wird am Umfang der Scheibe eine Reibung erzeugt, welche die Welle der Maschine belastet. Die Größe der Belastung kann man messen, indem man mit Hilfe der Brückenwage W die Kraft feststellt, die der Hebel an seinem Ende ausübt. Ist nämlich der Druck auf die Brückenwage P wirksam am Hebelarm l, so ist die Maschine mit dem Drehmoment $M_d = P \cdot l$ belastet, und bei n minutlichen Umläufen ist die Leistung der Maschine $N = \frac{M_d \cdot n}{716} = \frac{l \cdot P \cdot n}{716}$. Die Größe $\frac{l}{716}$ ist für einen Zaum, mit dem man eine Reihe von Bremsungen ausführt, stets die gleiche, man ermittelt sie ein für allemal und nennt sie Bremskonstante $C = \frac{l}{716}$. Bei der einzelnen Bremsung ist dann $N = C \cdot P \cdot n$.

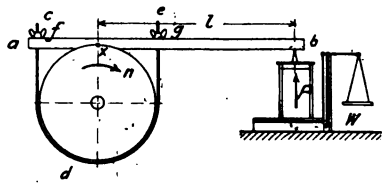


Fig. 116. Zaum.

Man kann diese Gleichung auch direkt und anschaulicher ableiten: Am Umfang der abgebremsten Riemenscheibe wirken, rund herum, Reibungskräfte, die wir zu einer Umfangskraft U zusammenfassen. U wirkt am Zaum im Sinne der Wellenumdrehung, an der Scheibe umgekehrt. Der Angriffspunkt dieser Kraft U, d. i. der Scheibenumfang, legt in der Sekunde $2\pi r \cdot \frac{n}{60}$ Meter zurück. Also ist die Leistung $N = \frac{U \cdot 2\pi r \frac{n}{60}}{75}$. Hierin sind U und r unbekannt, es ist aber $U \cdot r = P \cdot l$ eine Gleichgewichtsbedingung für den Zaum. Also kommt $N = \frac{P \cdot l \cdot 2\pi n}{60 \cdot 75} = C \cdot P \cdot n$, wo $C = \frac{2\pi l}{60 \cdot 75}$ dieselbe Bremskonstante ist wie oben.

In P darf das Eigengewicht des Holzhebels $a\,b$ nicht enthalten sein, das schon von vornherein auf die Wage drückt. Vor Beginn des Versuchs löst man deshalb die Schrauben $f\,g$ ganz, bringt eine Schneide, etwa eine Dreikantfeile bei x zwischen Scheibe und Bremse, und tariert, nachdem man so die Reibung beseitigt hat, die Wage aus. Die Tara ist dann später abzuziehen.

Außer in der Form Fig. 116, oben Hebel, unten Stahlband, findet man Zäume auch in der Ausführung Fig. 117: zwei Holzbacken werden durch Eisenstangen gegeneinander gezogen. Federn bei $x\,y$ sind zum gleichmäßigen Arbeiten unbedingt nötig, sonst wird nämlich, wegen der Starrheit des ganzen Apparats, beim Drehen der Mutter um nur $^1/_2$ oder 1 Gang die Welle gleich vollständig be- oder entlastet; Federn lassen eine Vergrößerung der Kraft erst allmählich zu, in dem Maße wie sie sich zusammendrücken. Das Stahlband Fig. 116 ist so elastisch, daß man Federn zur Not entbehren kann. Nützlich sind sie immer, müssen aber passende Elastizität haben. — Der Zaum Fig. 117 drückt nicht auf eine Wage, sondern man hängt Gewichte direkt an ihn; das ist unbequemer.

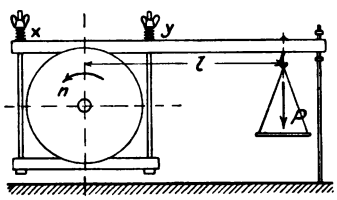


Fig. 117. Zaum.

Wir bemerken übrigens, daß der Zaum zwei Zwecken dient: er soll die zu untersuchende Maschine belasten — das geschieht durch Anziehen der Flügelmuttern — und er soll die Größe der erzeugten Belastung messen — das geschieht durch die Wage oder die Gewichte. Beide Funktionen sind unabhängig voneinander: durch Vermehren der Gewichte ändert man die Belastung nicht; wenn man aber die Maschine nur belasten, nicht die erzeugte Belastung messen will, so kann man die Wage durch ein festes Widerlager ersetzen.

136. **Praktisches; Schmierung und Kühlung.** Bei Benutzung des Zaums stellt man am besten die Gewichte, entsprechend der gewünschten Belastung, auf die Wage, und reguliert während der Versuchsdauer die Schrauben nach, so daß die Wage immer einspielt. Man wird nämlich bald bemerken, daß sich die von einem Zaum erzeugte Reibung fortwährend und in ziemlich weiten Grenzen ändert. Wenn man mit Öl gut schmiert, so werden die Schwankungen geringer, weil die Reibung der Ölteilchen an die Stelle der Reibung fester Körper tritt. An sich ist sonst die Schmierung dem Zwecke der Bremse, Reibung zu erzeugen, zuwider; man schmiere also nicht mehr als nötig.

Nicht identisch mit der Schmierung ist die Kühlung, welche die aus der vernichteten Arbeit erzeugte Wärme abführen soll. Sie soll möglichst reichlich geschehen, am besten durch Wasser. Danach ist es zweckmäßig, Schmierung und Kühlung ganz zu trennen, etwa das Kühlwasser reichlich

durchs Innere der hohl ausgeführten Scheibe zu schicken, und das schmierende Öl spärlich zwischen Scheibe und Bremse zu bringen. Solche umständliche Anordnung kann man nur bei festen Laboratoriumseinrichtungen verwenden. Oft begnügt man sich damit, entweder Öl oder Wasser zwischen Scheibe und Bremse zu bringen. Eine Emulsion von Öl in Seifenwasser, wie man sie beim Bohren verwendet, tut oft gute Dienste.

Wenn man Holzbacken oder doch Holzfutter verwendet, so bringt man zweckmäßig tiefe Nuten darin an, mit einem Einlaßrohr und einem Abflußrohr für die Wasserzirkulation. Läßt man das Abflußrohr fort, so kann nur wenig Wasser zutreten — soviel wie durch schlechtes Anliegen der Bremse ausquillt, und das ist bei gutem Anliegen nicht für die Kühlung ausreichend.

137. **Bandbremse.** Oft läßt man Holzbacken ganz fort und verwendet nur ein rund herum gehendes Bremsband, das an einer Stelle durch eine Mutter angespannt wird; diese Bandbremse ist in Fig. 118 dargestellt. Die Messung des Drehmoments geschieht in Fig. 118 direkt durch Gewichte, die an einem Seil hängen. Falsch wäre die Anbringung des Seils am Bremsband nach Fig. 119; wenn die Gewichte auf und ab pendeln, ändert sich der Hebelarm an dem sie angreifen. Das Seil soll ein Stück über das

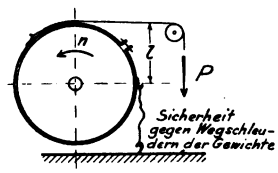


Fig. 118. Bandbremse.

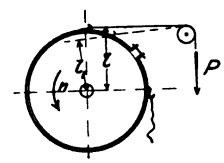


Fig. 119. Bandbremse.

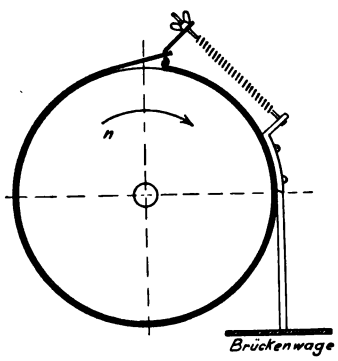


Fig. 120. Bandbremse.

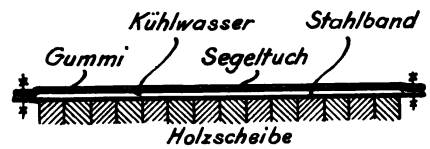


Fig. 121.

Fig. 122.

Bremsband hin- und dann tangential ablaufen. Der Hebelarm l für die Gewichte P ist Scheibenradius vermehrt um Bremsbanddicke und halbe Seildicke.

In Fig. 120 ist die Spannschraube besser zu bedienen. Die Messung der Kraft geschieht mit Brückenwage. Die Drehrichtung der Scheibe ist umgekehrt wie vorhin.

Man kann die Kühlung ins Innere des Bremsbandes verlegen; die Bremsbänder erhalten dann Querschnitte nach Fig. 121. Im Innern zirkuliert Wasser. Das Bremsband, Fig. 122, wird von außen mit Wasser besprüht, welches verdampft.

138. **Selbstregulierende (automatische) Bremsen.** Weil sich bei nicht ganz gleichmäßiger Schmierung die Reibung beständig ändert, so muß man bei Zaum und Bandbremse die Anspannung der Bremse von Hand nachregulieren, so nämlich, daß das Produkt aus Reibungskoeffizient und Spannung der Bremsbacken konstant bleibt — die Umfangskraft soll konstant bleiben. Selbsttätige Bremsen bewirken diese Nachregulierung automatisch.

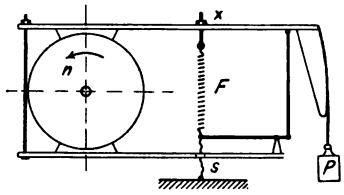


Fig. 123.

Fig. 123 erklärt das Prinzip der Selbstregulierung. Die Maschine soll so belastet sein, wie es dem Gewichte P entspricht. Ist nun etwa die Anspannung der Bremsbacken zu groß, so wird die ganze Bremse in der Drehrichtung mitgenommen. Dadurch wird Schnur s gespannt und löst die Bremse ein wenig. Ist umgekehrt die Reibung der Bremsbacken zu gering, so zieht das Gewicht P die Bremse zurück, und die Feder F spannt die Bremse nach. Beim Beginn des Versuches hängt man das gewünschte Gewicht P an die Bremse und reguliert die Schraube x so ein, daß die Schnur s gerade schlaff bleibt. Die Bremse, Fig. 124, wird seit

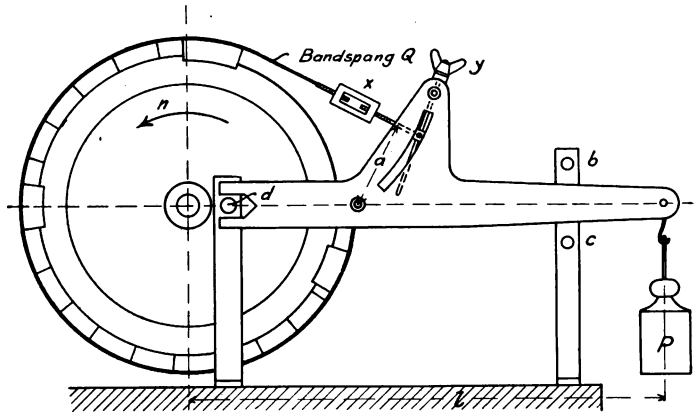


Fig. 124. Selbsttätige Bandbremse.

Jahren im Prüffelde von Siemens & Halske angewendet und gelobt. Je nachdem, ob die Bremse durch zu große Reibung mitgenommen wird oder ob sie zurückfällt, wird der Hebel durch Anstoßen an Stift d im einen oder anderen Sinn verdreht und das Bremsband gelöst oder gespannt. Die

Stifte b und c dienen nur als Hubgrenzen für den Notfall. Zum Einstellen am Beginn des Versuches dienen die Schrauben x und y; erstere ändert

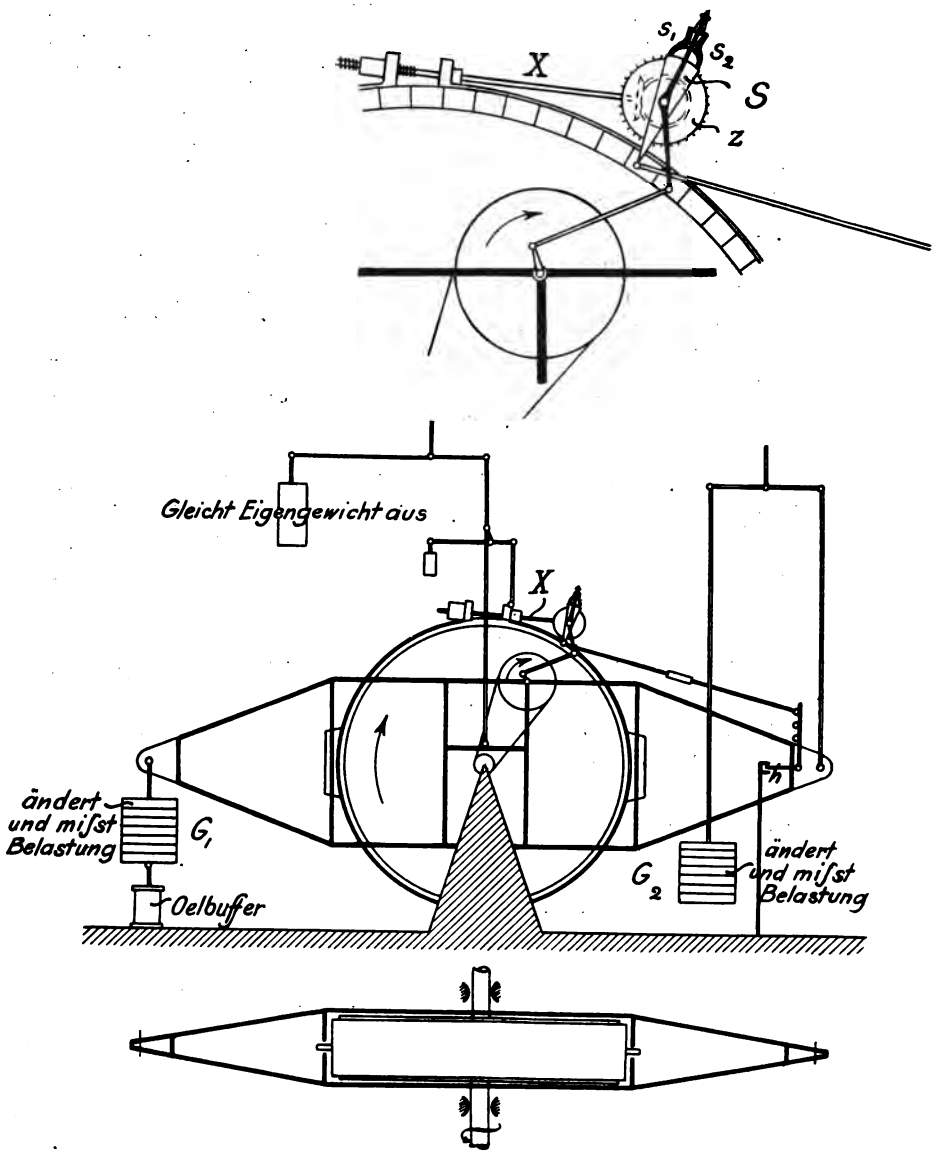


Fig. 125. Selbsttätige Bremse.

die Länge des Bremsbandes, letztere den Hebelarm an dem die Spannung des Bandes angreift. Die Handhabung im einzelnen ist in Elektrot. Z. 1901, S. 339, kürzer in Z. d. V. d. I. 1901, S. 1078 beschrieben.

Die letzte Bremse hat sich praktisch durchaus bewährt, doch ist zu erkennen, daß sie, einmal eingestellt, nicht auf konstante Umfangskraft, sondern auch bei wechselndem Reibungskoeffizienten auf konstante Bandspannung Q reguliert: es muß ja stets $Q \cdot a = P \cdot l$ sein. Entspricht diese Bandspannung nicht mehr dem angehängten Gewicht P, so kann sie sich nur dadurch ändern, daß der Hebel dauernd am Stift d anliegt. Die Kraft, mit der diese Berührung statthat, fälscht das Meßergebnis. Um diese Fälschung möglichst klein zu halten, ist der Stift d dicht an die Welle der Bremsscheibe gesetzt: das Moment der dort auftretenden Zusatzkraft wird klein sein. — Ganz ebenso wird das Meßergebnis beim Zaum, Fig. 123, um so viel gefälscht, wie die Schnur s gespannt ist. Diese Kraft ist klein, weil sie am langen Ende des zweiarmigen Hilfshebels angreift.

Soll dieser Fehler vermieden werden, so muß die Nachstelleinrichtung selbstsperrend sein, so daß sie ohne Zusatzkraft bei jeder Bremsbandspannung einspielen kann. Die folgende Bremse (Fig. 125) befindet sich im technischen Institut in Boston. Man wird erkennen, wie das von der Reibung erzeugte Drehmomeut durch die Gewichte G_1 und G_2 ausgeglichen und gemessen wird. Sobald man diese Gewichte ändert, ändert sich von selbst die Spannung des Bremsbandes. Die Sperrkegel s_1 und s_2 (in der Nebenfigur) werden nämlich durch die Maschine dauernd in schwingende Bewegung gesetzt und wollen die Spannung des Bremsbandes der eine vermehren, der andere vermindern. Beide werden für gewöhnlich durch Segment S daran gehindert. Dies Segment wird aber vom Hebel h aus verstellt, sobald die Reibung am Scheibenumfang nicht gerade den aufgelegten Gewichten entspricht und daher das ganze Gestell der Bremse entweder im einen Sinn der Reibung oder im anderen Sinn den Gewichten folgt und aus der wagerechten Lage kommt. Dann kommt einer der Sperrkegel s_1 und s_2 in Eingriff mit x, und Schraube X ändert die Spannung des Bremsbandes.

Weitere selbsttätige Bremsen ersehe man aus der Literatur. Sie haben an Bedeutung verloren, seit man für Laboratoriumszwecke — dafür sind sie nur brauchbar, weil sie in der Praxis für einmalige Benutzung zu teuer werden — bequemere, namentlich elektrische Bremsvorrichtungen hat. Man fand sie wohl stets mehr in der Literatur als ausgeführt.

139. **Alden-Bremse.** Die Alden-Bremse ist eine äußerst sinnreiche Vorrichtung, die in Amerika so vielfach für stationäre Laboratoriumszwecke angewendet wird, daß ihre Darstellung in Fig. 126 lohnend erscheint. Die Pressung des Leitungswassers von 3 bis 4 at drückt Kupferbleche gegen die rotierenden Gußeisenscheiben, und dient zugleich zur energischen Kühlung. Die Räume auf der anderen Seite der Kupferbleche sind ganz voll Öl, welches durch die rotierenden Gußeisenscheiben in Schmiernuten nach außen geschleudert wird und so zirkuliert. Man sieht wie gut hier Kühlung und Schmierung geschieden sind. Die Kupferbleche nutzen sich kaum ab, weil

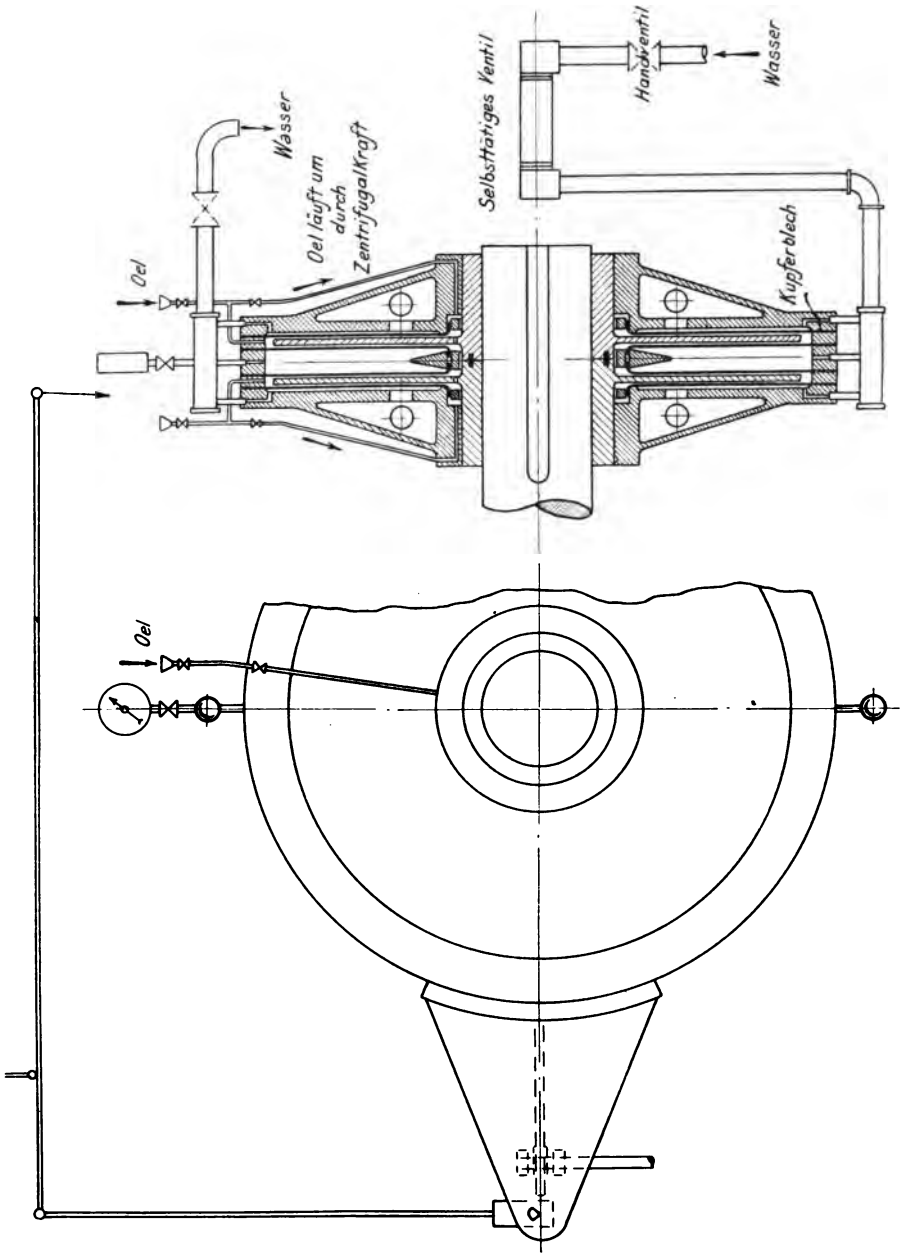


Fig. 126. Alden-Bremse.

gut geschmiert wird und weil die Flächenpressung gering ist, so daß überall Öl sich hält. Man mißt das erzeugte Drehmoment durch Gewichte. Das selbsttätige Ventil, Fig. 127 vergrößert dargestellt, hält die Belastung konstant: es gibt mehr oder weniger Wasser, je nachdem das Gehäuse der Bremse den Gewichten oder der Reibung folgt, und hält es in der Mittellage. — Diese Bremse ist ihrem Wesen nach dem Pronyschen Zaum gleichwertig: die Belastung der Maschine wird durch Reibung fester Körper erzeugt. Nur werden diese festen Körper hier durch Wasserdruck, sonst durch Schrauben aneinander gepreßt. Verwendet man das selbsttätige Ventil, so ist die Alden-Bremse den selbsttätigen Bremsen beizuzählen, sonst muß man ein Wasserventil von Hand bedienen.

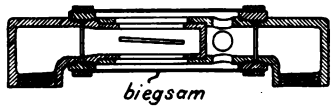


Fig. 127. Selbsttätiges Ventil zur Alden-Bremse.

Eine etwas andere Alden-Bremse und ihre Anwendung für Lokomotivuntersuchungen ist in Z. d. V. D. I. 1904, S. 1321 beschrieben.

140. **Flüssigkeitsbremsen (hohe Tourenzahl).** Bei hohen Tourenzahlen setzt man zweckmäßig an die Stelle der Reibung fester Körper die innere Reibung von Flüssigkeiten. Dampfturbinen z. B. kann man mit einer Flüssigkeitsbremse nach dem Schema der Fig. 128 belasten. Eine Reihe von Scheiben rotiert mit der zu untersuchenden Welle zwischen anderen im Gehäuse festen Scheiben. Das Gehäuse wird, je nach der gewünschten Leistung, mehr oder weniger mit Wasser gefüllt, zum Grobregulieren hat man verschiedene Ventile, Feinregulierung erzielt man durch Bedienen des benutzten Ventils. Die Messung des Drehmoments geschieht

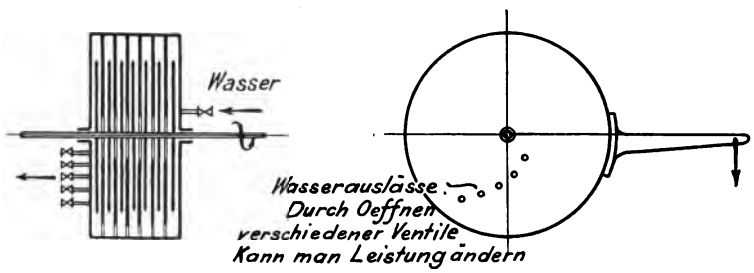


Fig. 128. Flüssigkeitsbremse.

wieder durch angehängte Gewichte oder mit einer Brückenwage an dem Arm. Weil der Widerstand in solcher Bremse mit dem Quadrat der Tourenzahl steigt, so ist diese Bremse nur für sehr schnellaufende Maschinen am Platze, etwa für Dampfturbinen, deren Abbremsung sonst Schwierigkeiten macht. Bei kleinen Umlaufzahlen erzeugen Flüssigkeitsbremsen kaum ein Drehmoment.

Für nicht ganz so hohe Umlaufzahlen kann man den Widerstand vergrößern, indem man statt glatter Scheiben solche mit einer Art Turbinenschaufelung verwendet (Froude-Bremse).

141. **Wirbelstrombremsen.** Endlich kann man an Stelle der mechanischen Reibung den durch elektrische Wirbelströme erzeugten Widerstand setzen, welchen eine massive Metallscheibe, das Schwungrad, erfährt, wenn sie sich an einem kräftigen Elektromagneten vorbeibewegt. Die von diesem erzeugten Kraftlinien müssen sich, aus seinen Polen austretend, durch das Schwungrad hindurch schließen. Eine Wirbelstrombremse kann nach Fig. 129 ausgeführt werden. Sie zeichnet sich durch große Einfachheit und dadurch aus, daß man die wesentlichen Teile, die U-Träger und die Elektromagnete, leicht für Schwungräder verschiedener Größe ummontieren kann. So erscheint sie auch für nichtstationäre Zwecke, für die Praxis,

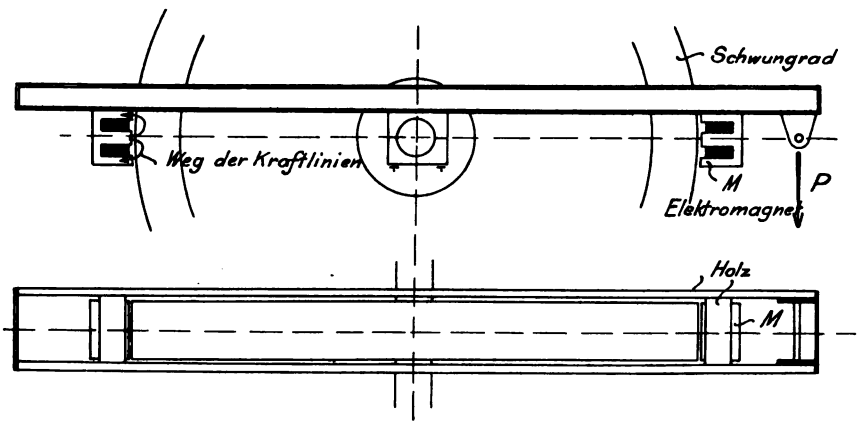


Fig. 129. Elektromagnetischer Zaum.

brauchbar, wo elektrischer Strom zur Verfügung steht. Verschiedenen Spannungen kann man sich anpassen durch Parallel- und Hintereinanderschalten der beiden Magnete, auch den Luftspalt zwischen Schwungrad und Magnet kann man variieren.

Die Belastung regelt man mittels eines Vorschaltwiderstandes, der die Stromstärke, wenige Ampere, ändert. Die erzielte Belastung wird wie beim Zaum gemessen: nur die Erzeugung der Belastung ist eine andere.

Solche Wirbelstrombremse ist bequem zu bedienen und gut brauchbar für Leistungen bis 50 PS oder bei kurz dauernden Versuchen. Für längere Versuche mit größerer Leistung macht die Abführung der erzeugten Wärmemenge Schwierigkeiten: Wasser gegen das Schwungrad gespritzt wird abgeschleudert und verunreinigt das Lokal. Beim einfachen Zaum liegt das Schwungrad nicht so frei.

142. **Seilbremse; Einfluß von Seil- und Hakengewicht.** Alle bisherigen Bremsen waren nur andere Formen des Zaums, auch die Bandbremse kann man dazu rechnen. Bei allen war die Erzeugung ganz von der Messung der Belastung getrennt. Die Seilbremse ist prinzipiell anders.

Ein Seil ist an der Decke mittels Federwage aufgehängt, Fig. 130, einmal um die zu belastende Scheibe geschlungen und dann zum Boden fortgeführt. Dort hängt man Gewichte nach Bedarf an. Die Anordnung muß so sein, daß die Gewichte angehoben werden, wenn die Scheibe sich dreht. Hängen etwa 10 kg bei G am Haken, so ist das Seil von G bis a mit $P = 10$ kg gespannt. Am Umfang der Scheibe findet nun aber Reibung statt. Wenn diese Reibung im Quadranten von a bis b gerade 6 kg ausmacht, wenn also auch die Scheibe in diesem Quadranten eine Umfangskraft von 6 kg erfährt, so hat das Seil bei b nur noch eine Spannung von $10 - 6 = 4$ kg; die verschwundenen 6 kg werden vom Umfang der Scheibe getragen. Eine Umfangskraft von im ganzen 3 kg im Quadranten bc vermindert die Seilspannung bei c auf 1 kg, und wenn dies eine Kilogramm noch vom Umfange cd aufgenommen wird, so ist das Seil von d bis e spannungslos, es hängt schlaff herab, die Federwage F zeigt nichts. — Vermindern wir durch gute Schmierung die Reibung, so werden von den drei Quadranten von a bis d vielleicht nur 6 kg getragen, das Seil hat bei d noch 4 kg Spannung und wenn Quadrant de noch 1 kg wegnimmt, so gehen 3 kg ins Seilende eF und werden an der Federwage abgelesen.

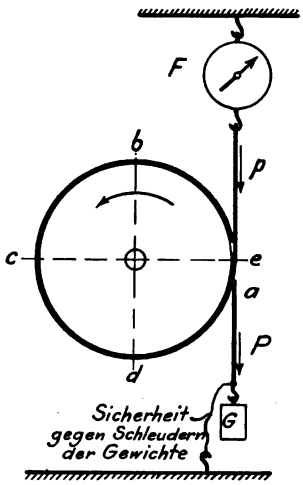


Fig. 130. Seilbremse.

Im ersten Fall war die am Scheibenumfang wirksame Umfangskraft 10 kg, im zweiten Fall ist sie $10 - 3 = 7$ kg. Im allgemeinen ist sie gleich der Differenz in der Spannung der beiden Seilenden, d. i. gleich anhängenden Gewichten minus Angabe der Federwage. Diese Umfangskraft $P - p$ ist gemessen in der Mitte des Seiles, also an einem Hebelarm $R + r$, wo R den Scheiben- und r den Seilradius bedeutet. Bei n minutlichen Umläufen ergibt sich also die Bremsleistung

$$N = \frac{2\pi \cdot (P - p)\,(R + r)\,n}{60 \cdot 75}$$

oder

$$N = C \cdot (P - p) \cdot n\,.$$

Wir haben wieder in der Bremskonstanten $C = \frac{2\pi\,(R + r)}{60 \cdot 75}$ diejenigen Größen zusammengefaßt, die bei mehreren Versuchen die gleichen bleiben.

Eine Seilbremse kann man sich leicht aus Stricken zusammenbauen. Krammen (Fig. 131) sichern die Seile gegen seitliches Herabfallen von der Scheibe. Man nimmt zwei Seile nebeneinander, um sie bei *e*, Fig. 130, symmetrisch durcheinander stecken zu können.

Bei der Berechnung muß man noch das Gewicht des Seiles selbst und das der Haken berücksichtigen, mit denen es an der Federwage und mit denen die Gewichte an ihm befestigt sind. Die sechs Teile des Seiles in Fig. 132, bei dem Eigengewicht von *1* und *6* die Haken eingeschlossen, beeinflussen nämlich das Meßergebnis wie folgt: *1* läßt p größer erscheinen als es ist, *2* ebenso; *3* und *4* gleichen einen Teil von P aus, so daß mehr Gewichte am Haken hängen und man mehr abliest, als wirksames P vorhanden ist; *5* und *6* bewirken, daß das abgelesene P zu klein ausfällt, weil ihr eigenes Gewicht noch zu P käme. Aus allem folgt, daß *2* und *5* den entgegengesetzten Einfluß auf die Größe $P - p$ haben wie *3* und *4*, ist also die Bremse symmetrisch, so fällt ihrer aller Einfluß aus. Man muß also die Krammen, Fig. 131, einigermaßen gleichmäßig auf die Quadranten verteilen. Seilende *1* läßt p größer, *2* läßt P kleiner ablesen als es ist; beide wirken also im gleichen Sinne dahin, daß $P - p$ zu klein abgelesen wird. Man hat die Differenz $P - p$ um das Gewicht s der Seilenden *1* und *6* einschließlich Haken zu vermehren, die Bremsformel geht dann über in $N = C(P - p + s)\,n$. — Dieses Gewicht s erreicht meist 1 kg, am Haken hängen selten mehr als 50 kg, also macht diese Korrektur selten weniger als 2 % aus!

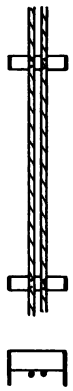


Fig. 131.

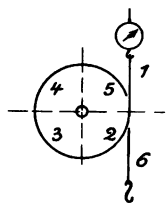


Fig. 132.

143. **Kritik: Seilbremse und Zaum.** Die Seilbremse dient wie der Zaum, dem doppelten Zweck, die Maschine zu belasten und die erzeugte Belastung zu messen. Beides ist aber hier nicht so scharf zu trennen wie beim Zaum. Das anhängende Gewicht tut beides.

Die Seilbremse arbeitet namentlich bei hohen Temperaturen ruhiger als der Zaum, weil sich das Schmiermittel in dem als Docht wirkenden Seil sehr gleichmäßig verteilt. Zum Schmieren verwendet man Wasser, das zum Verdampfen kommen kann und dann weitere Erwärmung energisch hindert, oder Öl. Die Seilbremse hat vor dem Zaum den weiteren Vorteil noch größerer Einfachheit der Herstellung, aber man kann die Belastung nicht beliebig weit steigern, weil schließlich beim Vermehren der Gewichte die Angabe der Federwage um ebensoviel zunimmt, man belastet dann die Federwage, nicht mehr die Maschine. Mehrfache Umschlingung der Scheibe schafft, wenn sie ausführbar ist, Abhilfe.

144. **Dimensionierung von Bremsen.** Um einen Anhalt für die Dimensionierung einer Bremse zu haben, berechnet man das abzubremsende

Drehmoment, dieses wird $M_d^{\mathrm{m \cdot kg}} = 716 \frac{N^{\mathrm{PS}}}{n^{\mathrm{T \cdot p \cdot m}}}$ sein. Bei einem Radius r der Bremsscheibe ist dann die aufzuwendende Umfangskraft $U = \frac{M_d}{r}$. Die Bremsbacken oder das Bremsband sind etwa mit dem zehnfachen von U anzupressen, da der Reibungskoeffizient zu 0,1 anzunehmen ist. Man muß also jeden der Bolzen in Fig. 117 mit 2,5 U anspannen können, auch das Bremsband in Fig. 119 muß bis zu 2,5 U ausreichen. Hiernach werden insbesondere auch die Federn, Fig. 117 und 120, zu wählen sein.

Außerdem darf die Flächenpressung zwischen Scheibe und Bremse möglichst nicht 4 kg auf den Quadratcentimeter übersteigen, um die Schmierung zu sichern. Hier ist man indes meist an die gegebene Scheibe gebunden. Die Flächenpressung ist $\frac{10\,U}{f}$, wenn f die ganze an der Scheibe anliegende Bremsbacken- oder Bremsbandfläche ist.

Bei der Seilbremse muß das Seil den Gewichten, d. i. etwas mehr als der Umfangskraft, genügen.

Eine Berechnung der elektromagnetischen Bremse, Fig. 129, ist nicht einfach.

145. **Wechselwirkung zwischen Bremse und Motor.** Im einzelnen ist über die Brauchbarkeit der verschiedenen Bremsen jedesmal das Erforderliche gesagt. Das Folgende aber bezieht sich auf die Tatsache, daß die Bremsen sich für verschiedene Motorengattungen verschieden gut eignen.

Die Bremsdynamometer scheiden sich nämlich in zwei Klassen. Die einen erzeugen ein von der Umlaufzahl unabhängiges Drehmoment, es sind das diejenigen, welche die Reibung fester Körper benutzen, Zaum, Band und Seilbremse, auch die beschriebene Alden-Bremse. Bei den Flüssigkeitsbremsen, bei der Wirbelstrombremse und bei der weiterhin zu besprechenden elektrischen Bremsung mittels Dynamomaschine vermehrt sich mit zunehmender Tourenzahl auch das Drehmoment, es wächst bei den Flüssigkeitsbremsen sogar mit dem Quadrat der Umlaufzahl.

Ähnliche Unterschiede finden wir, nur im umgekehrten Sinne, bei den Kraftmaschinen. Wenn wir von der Regulatorwirkung zunächst absehen, so erzeugen die Dampfmaschinen, auf konstante Füllung eingestellt, bei allen Tourenzahlen das gleiche Drehmoment, ebenso Gasmaschinen und andere Kolbenmaschinen. Die Folge davon ist, daß eine Dampfmaschine durchgeht, wenn das widerstehende Drehmoment kleiner ist als das von ihr erzeugte, und daß sie im entgegengesetzten Fall stehen bleibt. Danach könnte man nun eine Kolbenmaschine nicht mittels Zaum oder einer gleichwertigen Bremse bremsen: sind beide Drehmomente, treibendes und widerstehendes, gerade miteinander abgeglichen, so läuft die Maschine ruhig weiter; die kleinste Änderung in der Anspannung des Zaumes läßt sie durchgehen oder bringt sie zum Stehen. Daß diese Verhältnisse nicht so

kraß auftreten, liegt daran, daß, hauptsächlich infolge der Drosselung des Dampfes in den Zulaufkanälen, die Dampfmaschine doch ein mit wachsender Tourenzahl langsam abnehmendes Drehmoment erzeugt. Daher ist der Beharrungszustand einer mit Zaum gebremsten Kolbenmaschine zwar kein ganz labiler, aber doch ein nicht sehr stabiler. Ein guter Regulator freilich zwingt die Maschine, gleichmäßig zu laufen.

Bei anderen Motoren nimmt das erzeugte Drehmoment mit wachsender Tourenzahl rasch ab, so bei der Turbine, bei der bekanntlich das Drehmoment Null wird, wenn sie etwa die doppelte normale Tourenzahl erreicht, noch stärker beim Nebenschlußelektromotor. Hier wird sich stets ein guter Beharrungszustand einstellen bei der Tourenzahl, die dem vom Zaum erzeugten Drehmoment entspricht.

Flüssigkeits- und Wirbelstrombremsen gestatten die Abbremsung jedes Motors, wie wir nicht weiter ausführen wollen.

Das Gesagte soll die Tatsache erklären, daß die Abbremsung von Kolbenmaschinen mittels Zaumes oder dergleichen oft Schwierigkeiten macht, dann nämlich, wenn die Maschine nicht mit guter Regulierung versehen ist. Die Tourenzahl pendelt dann in weiten Grenzen auf und ab.

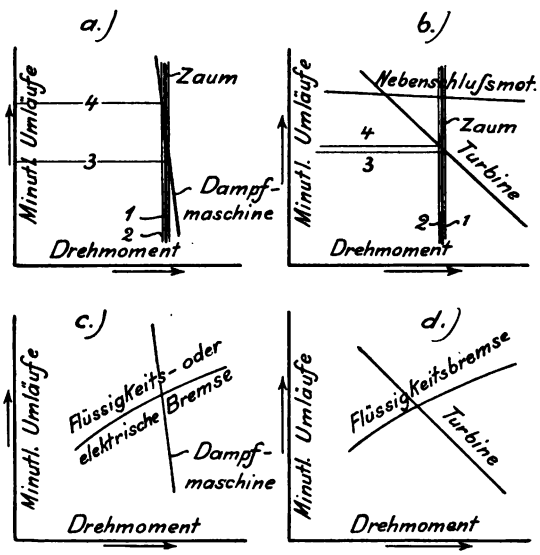


Fig. 133.

Wir können diese Beziehungen in den vier Diagrammen, Fig. 133, graphisch darstellen. Man sieht wie sich die beiden Linienzüge, welche die Veränderung der Umlaufzahl mit dem Drehmoment darstellen, bei Dampfmaschine und Zaum unter spitzem Winkel schneiden, so daß einer geringen Änderung des belastenden Drehmoments zwischen den Linien *1* und *2* eine große Änderung in der Umlaufzahl der Dampfmaschine, von *3* bis *4*, entspricht. In allen anderen Fällen, Fig. b bis d, liegen die Verhältnisse günstiger.

Trotzdem werden im allgemeinen der einfache Pronysche Zaum, die einfache Bandbremse und vor allem die Seilbremse diejenigen Vorrichtungen bleiben, die man anwendet, wenn man eine Maschine ein einzelnes Mal abbremsen will — also in vielen Fällen der Praxis. Für den statio-

nären Betrieb in Laboratorien und Prüffeldern sind die vollkommeneren Formen vorzuziehen.

146. **Elektrische Leistungsmessung.** Wo immer man in der Lage ist, die Leistung in elektrischer Form zu messen, da ist dies die bequemste und meist auch genaueste Methode; sie ist den mechanischen Methoden dann unbedingt vorzuziehen.

Es sind zwei Fälle möglich.

Entweder es wird eine Arbeitsmaschine, sagen wir eine Pumpe, elektrisch angetrieben. Man entnimmt den Strom irgend einer elektrischen Zentrale und mißt mittels Volt- und Amperemeters die Spannung und Stromstärke: beider Produkt ist die dem Elektromotor zugeführte Leistung. Kennen wir noch den Wirkungsgrad η des Elektromotors, so haben wir die der Pumpe zugeführte Leistung $N = N_{\text{mot}} \cdot \eta$.

Im anderen Falle wird eine Kraftmaschine, sagen wir eine Dampfturbine, elektrisch belastet. Die von ihr erzeugte Energie wird nicht durch Abbremsen in Wärme verwandelt, sondern durch eine Dynamomaschine in Elektrizität umgesetzt. Der erzeugte Strom wird nach Spannung und Stromstärke festgestellt: beider Produkt ist die elektrische Leistung des Dynamos. Die Effektivleistung der Dampfturbine war etwas größer, sie ist $N = \frac{N_{\text{dyn}}}{\eta}$, wenn η der Wirkungsgrad des Dynamos. — Die Messung wäre hiermit erledigt; wir haben uns aber noch danach umzusehen, wo denn die in elektrische Form umgesetzte Energie bleibt. Wir können sie selten nutzbar machen, etwa für Ladung einer Sammlerbatterie oder bei Zentralen für Speisung eines Netzes. Meist müssen wir die elektrische Energie irgendwie nutzlos abführen und sie in Draht- oder Wasserwiderständen „vernichten", d. h. in Wärme oder dergleichen verwandeln.

Außer der eigentlichen Messung werden wir also zu besprechen haben, wie man den Strom vernichten kann, und werden ferner über den Wirkungsgrad η der elektrischen Maschinen zu reden haben.

Dabei beschränken wir uns durchweg auf Gleichstrom-Nebenschlußmaschinen. Wir setzen die Kenntnis der elektrischen Apparate im allgemeinen voraus: was sich mit kurzen Worten darüber sagen ließe, wäre für den Kenner überflüssig und für den Nichtkenner unzureichend.

Die Ablesung geschieht an einem Voltmeter und einem Amperemeter. Die elektrische Leistung in Watt ist gleich der Anzahl der Volt mal der Amperezahl; 1000 Watt sind 1 Kilowatt (KW), 736 Watt sind 1 PS. Über die Berechnung vergleiche man § 11.

147. **Wirkungsgrad der elektrischen Maschinen.** In den meisten Fällen wird es genügen, den Wirkungsgrad des Elektromotors oder der Dynamomaschine den Kurven zu entnehmen, welche wir in Fig. 134 und 135 geben. Die Kurven sind Mittelwerte aus den Angaben der A. E. G. und von S. & H. Sie stellen für Maschinen verschiedener Größe den Gesamtwirkungsgrad

bei verschiedenen Belastungen dar. Dabei sind diese verschiedenen Belastungen in Prozenten der normalen Belastung angegeben, welche auf dem Firmaschild jeder elektrischen Maschine angegeben ist: das Schild enthält die Angabe, für wieviel Volt und wieviel Ampere normal die Maschine bestimmt ist. — Die Kurven sind für Motor und Dynamo getrennt. Doch ist zu bemerken, daß beide Figuren die gleichen Werte darstellen, nur ist als Abszisse jedesmal die Ablesung an den elektrischen Instrumenten aufgetragen, die Motorkurven beziehen sich also auf die hineingesandte, die Dynamokurven auf die herausgenommene Energie; daher der äußerliche Unterschied.

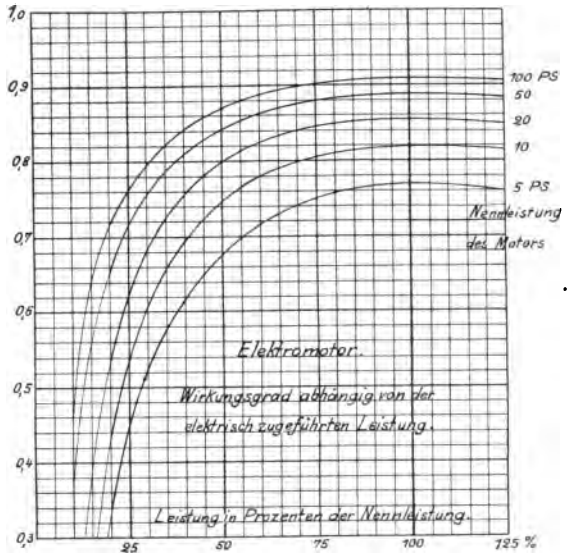


Fig. 134.

Die Kurven dürften über 30 % Belastung und bei den größeren Maschinen stets bis auf 1 oder 2 % zutreffen. Kleine Maschinen und alle Maschinen bei kleiner Belastung zeigen Abweichungen voneinander je nach dem Typ. Unter 20 % Belastung werden die Kurven unzuverlässig sein.

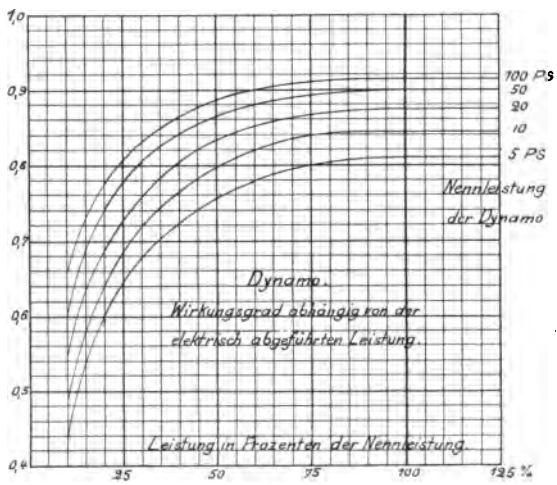


Fig. 135.

Besser tut man natürlich, sich von der Fabrik die für den betreffenden Maschinentyp geltende Kurve geben zu lassen.

Alle solche Kurven gelten genau genommen nur, wenn man die

Maschine stets mit voller Spannung betreibt und die Belastungsänderungen nur von Änderungen der Stromstärke herrühren. Doch ist diese Bedingung wohl nicht sehr wesentlich.

Ist ein Riemen- oder Seiltrieb zwischen zu untersuchender Maschine und der elektrischen, so ist dessen Wirkungsgrad noch, meist wohl schätzungsweise mit 95 %, einzuführen. Den Verlust durch Schlüpfung kann man auch leicht messen. — Direkte Kupplung ist natürlich vorzuziehen.

148. **Schaltung für Antrieb von Arbeitsmaschinen.** Wir geben in den Fig. 136—138 das Schema für eine Reihe von einfachen Schaltungen, wie sie für unsere Zwecke in Frage kommen.

In Fig. 136 wird eine Arbeitsmaschine vom Elektromotor MN angetrieben. Dieser ist dazu an die beiden Leiter + und — des städtischen Netzes angeschlossen. Dabei ist die Feldwicklung N parallel zum Anker M

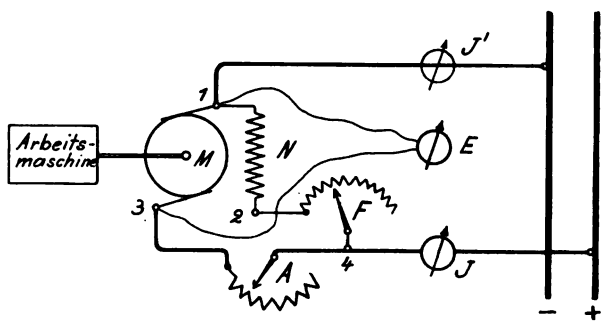


Fig. 136.

geschaltet: bei *4* teilt sich der Strom, um sich bei *1* wieder zu vereinen. Zu beachten ist, daß das Amperemeter den ungeteilten Strom zu messen hat, also bei J oder bei J' anzubringen ist; nur dann sind die Angaben über den Wirkungsgrad des Motors brauchbar, welche die Feldverluste mit berücksichtigen. — Um dem Motoranker beim Anlauf, wenn er noch keine elektromotorische Gegenkraft entwickelt, eine kleinere Spannung zuzuführen, wird die Spannung durch den Anlaßwiderstand A abgedrosselt. Zu beachten ist, erstens daß der Anlaßwiderstand hinter *4* anzuschließen ist, so daß der Nebenschluß von vornherein voll erregt ist, zweitens, daß das Voltmeter E hinter dem Anlaßwiderstand angeschlossen wird, denn es soll nicht die Netzspannung, sondern die dem Motor zukommende Spannung gemessen werden. Letztere Vorschrift ist freilich nur dann wesentlich, wenn man den Anlaßwiderstand nicht nur beim Anlassen benutzt, sondern die Tourenzahl damit reguliert — vorausgesetzt, daß er die zur Tourenregulierung nötigen Abmessungen hat. Im allgemeinen benutzt man nicht den Anlaßwiderstand zur Tourenregulierung, sondern einen besonderen Feldregulator F im Nebenschluß: je mehr Widerstand man bei F einkurbelt,

je mehr man also die Felderregung schwächt, desto schneller läuft der Motor. Verzichtet man auf Tourenregulierung, so kann der Feldregulator fortbleiben, der Anlaßwiderstand indes ist nötig. Er kann ein Wasserwiderstand sein. — Der Motor hat drei Polklemmen *1*, *2* und *3*, die, wie ersichtlich, verbunden werden.

149. **Schaltung für Bremsung von Kraftmaschinen.** Fig. 137 gibt die Schaltung, wie sie angewendet wird, wenn eine Kraftmaschine durch Dynamo belastet werden soll. Diese Anordnung ersetzt die Belastung durch Bremse, wird deshalb wohl auch elektrische Bremsung genannt. Die Klemmenspannung der Dynamomaschine DN, die im Anker D erzeugt wird, wird am Voltmeter E gemessen. Da der Anlaßwiderstand der Fig. 136 fehlt, so ist es gleichgültig, ob das Voltmeter zwischen *1* und *3*, oder ob es zwischen *1* und *4* gelegt wird, wie gezeichnet. Von dem infolge der erzeugten Spannung entstehenden Strom wird ein Teil bei *4* abgezweigt, um die Erregung des Magnetfeldes bei N zu speisen; zur

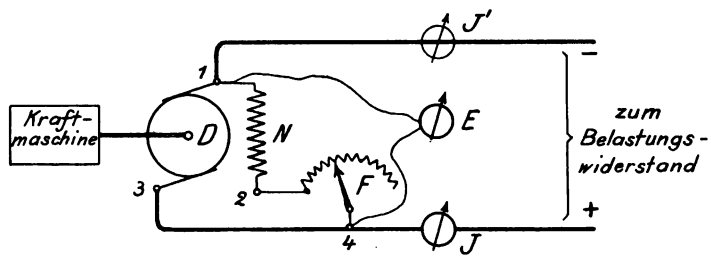


Fig. 137.

Regelung der Erregung und damit der erzeugten Spannung dient der Feldregulator F, der diesmal nicht fehlen darf. Zu beachten ist, daß das Amperemeter J hinter die Abzweigung der Felderregung kommt, nicht etwa zwischen *3* und *4*. Nur dann sind die Wirkungsgradkurven, welche für elektrische Maschinen gegeben werden, anwendbar. — Der erzeugte Strom wird bei + und — zu einem Belastungswiderstand geführt, über den wir unten sprechen.

Es kommt vor, daß man es bequemer findet, die Erregung der Maschine von einer Sammlerbatterie bewirken zu lassen statt vom Maschinenstrom selbst. Die Maschine ist dann eigentlich eine magnetelektrische, keine Dynamomaschine mehr. Die Belastung ist bei dieser Schaltung gelegentlich sicherer einzuregulieren als bei der früheren. Nun muß man aber ein Amperemeter i und eigentlich auch noch ein Voltmeter e an die Felderregung legen (Fig. 138) und von der im Anker erzeugten elektrischen Leistung die im Feld verbrauchte abziehen. Erst diese verminderte Leistung hat man durch den Wirkungsgrad der Dynamomaschine zu dividieren, um die effektive Leistung der Kraftmaschine zu erhalten; denn der

Wirkungsgrad der Dynamomaschine war einschließlich der Feldverluste angegeben.

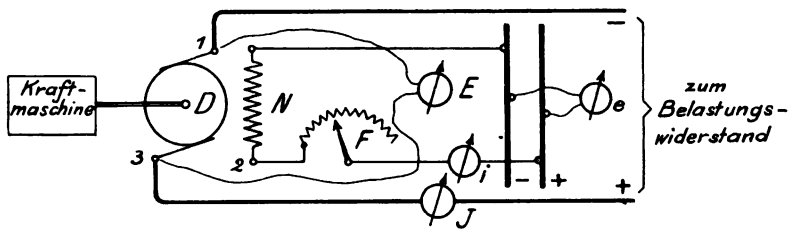


Fig. 138.

150. **Belastungswiderstände.** Bei der elektrischen Bremsung wird die zu messende Energie vorher in Elektrizität umgesetzt. Nach erfolgter Messung muß nun die Elektrizität ihrerseits vernichtet, d. h. in irgend eine unnütze Energieform übergeführt werden, meist in Wärme. Das geschieht in Belastungswiderständen.

Zwar kann man häufig die erzeugte Elektrizität nützlich verwerten, etwa den Strom in eine Sammlerbatterie oder in ein Beleuchtungsnetz geben. Das ist dann natürlich vorzuziehen; die Besprechung dieses Falles würde aber zu weit führen. Außerdem ist es nicht immer möglich, eine solche Belastung willkürlich auf eine eben gewünschte Höhe zu bringen und namentlich sie genügend lange konstant zu halten. Dann muß man doch noch einen Teil der Belastung nutzlos vernichten, um diesen Teil beliebig nachregulieren zu können.

Belastungswiderstände bestehen aus einem Metallwiderstand, einer Glühlampenbatterie oder aus einem Wasserwiderstand.

Einen Metallwiderstand kann man provisorisch aus Eisendrahtspiralen herstellen. Für seine Dimensionierung ist maßgebend, daß er einen bestimmten Widerstand haben muß, welcher, in Ohm gemessen, durch den Quotienten aus Spannung und Stromstärke gegeben ist. Diesen erforderlichen Widerstand könnte man erzielen, indem man einen relativ kurzen, sehr dünnen Draht verwendet. Ein solcher wäre aber nicht imstande, die entstehende Wärme nach außen abzugeben; der Draht muß vielmehr eine gewisse Oberfläche für die Ausstrahlung haben. Deshalb nimmt man eine Reihe von parallel geschalteten Drähten von meist 1 bis 2 mm Durchmesser: je dünner und dafür zahlreicher die Drähte, desto größer wird die ausstrahlende Oberfläche im Verhältnis zum leitenden Querschnitt, aber desto unhandlicher wird das Drahtgewirr. — Bei Eisendraht ist der Widerstand durch die Formel $W = \frac{l_{\text{mtr}}}{10\ d^2_{\text{mm}}}$ gegeben; ein Quadratmeter strahlender Oberfläche kann etwa 10 PS bewältigen, bei guter Ventilation viel mehr. Daraus ergibt sich folgende Tabelle:

Eisendraht, Erglühen zulässig	Zulässige Stromstärke Amp.	Geringste Drahtlänge in m bei 110 V	220 V	440 V	Vernichtete Leistung in PS bei 110 V	220 V	440 V
⌀ 1,5 mm	28	90	180	125	4	8	17
2 mm	43	103	206	245	6,5	13	26
3 mm	79	125	410	490	12	24	48

Man schaltet nun so viel Leiter parallel, daß die nötige Amperezahl bewältigt werden kann, und reguliert die Belastung durch Ausschalten von Leitern. Die Drähte können, wenn entsprechend montiert, ruhig rotwarm werden. Ganz praktisch ist es, ein wagerechtes Eisenrohr mit Asbest zu umwickeln und darüber die weitgewundene Drahtspirale zu hängen.

Glühlampenwiderstände sind selten zu beschaffen. Eine Glühlampe pflegt 220 Volt zu erfordern, bei 440 Volt Spannung muß man also je zwei in Serie schalten. Im übrigen schaltet man deren so viel parallel, daß die nötige Stromstärke erreicht wird.

Wasserwiderstände sind bequemer als Drahtwiderstände, die bei größeren Leistungen recht unhandlich werden. Sie sind auch leichter herzustellen. Eisenbleche tauchen in Sodalösung; verdünnte Säure ist durch ihren Geruch lästig. Der Plattenabstand sollte etwa mit der zu vernichtenden Spannung zunehmen. Bei 220 Volt ist 10 cm ein passender Plattenabstand. Man stellt eine Reihe von Platten parallel zueinander in Rillen eines Holztroges und verbindet sie abwechselnd mit den beiden Polen; so werden beide Seiten der Platten ausgenutzt außer bei den äußersten. Mit einem Quadratmeter Plattenfläche bewältigt man 350 bis 400 Ampere. Das ist so gemeint, daß für diese Stromstärke ein Quadratmeter positiver und eines negativer Platte nötig sind, wobei jedoch, sofern beide Seiten einer Platte ausgenutzt werden, auch beide einzeln in Rechnung zu setzen sind: eine Platte von 50×100 cm Abmessung kann, wenn beide Seiten ausgenutzt sind, 350 bis 400 Ampere leiten. Die Sodalösung kann ruhig zum Sieden kommen, das Verdampfte ersetzt man. Bei Spannungen nicht unter 220 Volt kann man auch fließendes Wasser ohne Soda nehmen und so die Dampfentwicklung umgehen. Zum Regulieren der Stromstärke hebt man die Platten nach Bedarf aus dem Wasser. Noch energischer reguliert man durch Veränderung der Konzentration der Sodalösung; tut man Soda hinzu, so steigt die Stromstärke.

151. **Indikator und Diagramm.** Der Indikator ist eines der wichtigsten Instrumente zur Untersuchung von Kolbenmaschinen. Er stellt die Änderungen der auf den Kolben drückenden und durch die Spannung der Flüssigkeit, des Gases oder Dampfes hervorgerufenen Kraft als Funktion des vom Kolben zurückgelegten Weges dar; er verzeichnet also die Kolben-

wege als Abszissen, die Kolbenkräfte als zugehörige Ordinaten. Das so entstehende Schaubild heißt Indikatordiagramm. Es hat oft die in Fig. 139 für ein Dampfdiagramm als Beispiel angegebene Form. Auf dem Hinweg des Kolbens, von links nach rechts, stellt die Linie abc den Verlauf der Kolbenkraft dar, auf dem Rückgange gibt Linie def ihn wieder. Dann bedeutet die Fläche des Diagramms, d. i. der Inhalt der Figur $abcdef$, die vom Dampf an den Kolben abgegebene Arbeit.

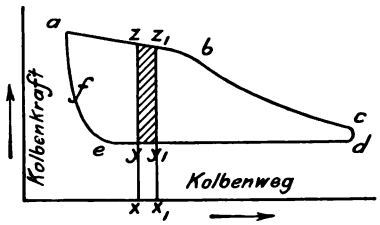


Fig. 139.

Während nämlich der Kolben sich beim Hingange von x nach x_1 bewegte, lastete die Kraft xz auf ihm, der Dampf gab also eine Arbeit $xz \times xx_1 = xx_1z_1z$ an ihn ab. Während aber der Kolben beim Rückgange von x_1 nach x ging, lastete die Kraft xy auf ihm; diesmal aber wirkte die Kraft der Bewegung entgegen, der Kolben mußte also Arbeit leisten, nämlich den Dampf zurückdrängen. Der Kolben gab also jetzt die Arbeit yy_1x_1x wieder her. So stellt Fläche zz_1y_1y diejenige Arbeit dar, welche dem Kolben verblieben ist. Denkt man das ganze Diagramm in schmale Streifen zerlegt, so sieht man, daß auch sein ganzer Flächeninhalt die ganze vom Dampfe an den Kolben abgegebene Arbeit darstellt.

152. **Indikatorteile.** Ein Indikator ist in Fig. 140 schematisch dargestellt. Er besteht aus einem kleinen Zylinder, in dem ein Kolben spielt. Der Indikator wird an den sogenannten Indikatorstutzen des zu untersuchenden Zylinders angeschraubt, so daß der Raum A unter dem Kolben mit dem Maschinenzylinder verbunden ist und die dort herrschende Spannung auch in ihn gelangt. Mit wechselnder Spannung wird die Feder F zusammengedrückt oder ausgedehnt, je höher die Spannung in A ist, desto höher stellt sich der Kolben und daher auch, wie man leicht übersehen wird, der Schreibstift S ein, welcher Striche auf der Papiertrommel T beschreibt: auf einem um die Trommel gelegten Papierblatt trägt der Schreibstift die Spannungen im Maschinenzylinder als Ordinaten, senkrecht, auf. Die Kolbenkräfte sind diesen Spannungen proportional, man kann also die Ordinaten auch als Kolbenkräfte betrachten. — Die Papiertrommel T wird durch eine um ihren Umfang gelegte Schnur vom Kreuzkopf oder von

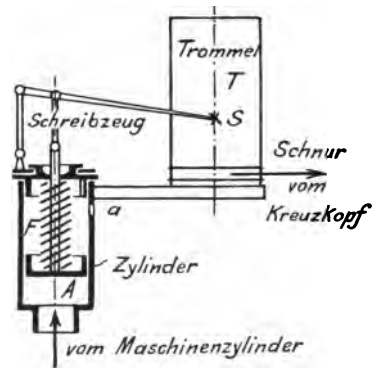


Fig. 140. Indikator, schematisch.

einem anderen Maschinenteil, welcher die gleiche Bewegung wie Kreuzkopf und Kolben macht, angetrieben. Beim Hingang des Kolbens wird die Trommel von der Schnur mitgenommen, beim Rückgange hält eine Feder im Trommelinnern die Schnur straff und führt die Trommel zurück. Infolge dieser Bewegung zeichnet der Schreibstift auf dem Trommelumfang und auf dem Papier die Kolbenwege in wagerechtem Sinne, als Abszissen, auf. Es ist nicht nötig, daß die Kolbenwege in natürlicher Größe verzeichnet werden, man darf und muß sie so weit reduzieren, daß der ganze Kolbenweg auf höchstens einen Trommelumfang zusammengedrängt wird. Doch soll die Trommelbewegung proportional der Kolbenbewegung bleiben. Diese Reduktion des Maschinenhubes wird durch Hubverminderer bewirkt (§ 157).

Läßt man nun gleichzeitig die Papiertrommel vom Kreuzkopf aus und den Indikatorkolben durch die Spannung im Maschinenzylinder in Bewegung setzen, so wird ein Diagramm verzeichnet, dessen Fläche die von der einen Kolbenseite und bei einem Hub der Maschine gelieferte Arbeit darstellt.

Zwischen Indikator und Maschinenzylinder schraubt man einen Indikatorhahn. Dieser gestattet den Indikator vom Dampfzylinder abzusperren und verbindet dann durch eine feine Seitenbohrung das Indikatorinnere mit der Atmosphäre. Zieht man bei geschlossenem Hahn eine Linie auf dem Diagrammpapier, so gibt diese Atmosphärenlinie — eine wagerechte Gerade — die Basis ab, von der aus man die Spannungsmessungen vornimmt, ihre Höhenlage entspricht dem atmosphärischen Druck im Indikatorzylinder.

Zu jedem Indikator gehört eine Anzahl Federn von verschiedener Stärke, welche daher die Spannungen in verschiedenem Maßstabe aufzeichnen lassen. Die Federn sind auswechselbar; man nimmt diejenige, welche bei der vorkommenden Höchstspannung noch gerade ausreicht, so daß der Schreibstift nicht oben über die Trommel hinausschießt, aber auch nicht zu kleine Diagramme zeichnet. Jede Feder trägt eine Angabe aufgestempelt, bis zu welcher Spannung sie brauchbar ist. Der Aufdruck 12 kg bedeutet, sie reiche bis zu 12 kg/qcm = 12 at aus. Außerdem trägt jede Feder einen zweiten Aufdruck, den sogenannten Federmaßstab. Der Aufdruck 5 mm bedeutet, daß eine Spannungsänderung von einer Atmosphäre (1 kg/qcm) einen Hub des Schreibstiftes von 5 mm erzeugt: ihr Federmaßstab ist 5 mm = 1 at. Die experimentelle Feststellung des Federmaßstabes heißt Federeichung und wird in § 158 besprochen. Mit der in runder Zahl aufgestempelten Angabe kann man sich nur bei rohen Messungen begnügen.

153. **Auswertung des Diagramms.** Das von einem Indikator verzeichnete Diagramm habe die Gestalt der Fig. 141. Sein Inhalt ist ein Maß für die Arbeit, d. h. ein doppelt so großes Diagramm bedeutet eine

doppelt so große Arbeit. Wie aber der Betrag der Arbeit oder besser gleich, wie unter Zuhilfenahme der minutlichen Umlaufzahl die Leistung der Maschine berechnet wird, das ist nun zu erörtern.

Der Quotient aus Fläche J des Diagramms und seiner Länge l heißt die mittlere Höhe desselben: $h_m = \frac{J}{l}$. Wollte man das Diagramm durch ein flächengleiches Rechteck von derselben Länge ersetzen, welches ja die gleiche Arbeit darstellte, so müßte das Rechteck diese Höhe h_m haben. Man mißt die Fläche mit dem Planimeter oder nach der Simpsonschen Regel, und bestimmt den Abstand der beiden Lote, die man auf der Atmosphärenlinie so errichtet, daß sie das Diagramm berühren (Fig. 141).

Dividieren wir nun die mittlere Höhe des Diagramms durch den Federmaßstab, so erhalten wir den mittleren Druck im Zylinder: $p_m = \frac{h_m}{m}$. Diese Größe gibt uns an, um wieviel beim Kolbenhingang die Spannung im Zylinder durchschnittlich größer war als beim Kolbenrückgang.

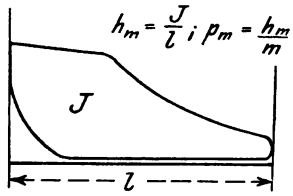


Fig. 141.

Nachdem wir p_m ermittelt haben, ist die Bestimmung der Maschinenleistung einfach: Bezeichnen wir mit F die wirksame Kolbenfläche der Maschine, mit s ihren Hub, mit n ihre minutliche Umlaufzahl, so ist $F \cdot p_m$ die mittlere Kolbenkraft und $F \cdot p_m \cdot s$ die bei einer Umdrehung — Hin- und Rückgang, weil ja p_m die Spannungsdifferenz aus Hin- und Rückgang ist — frei werdende Arbeit. Diese Arbeit wird in der Sekunde $\frac{n}{60}$ mal geliefert. Daher ist die indizierte Leistung für die eine Zylinderseite, der das Diagramm entstammt, $N_i^{PS} = \frac{F^{qcm} \cdot p_m^{at} \cdot s^m \cdot n}{60 \cdot 75}$. Die 75 gibt den Übergang von $\frac{m \cdot kg}{sec}$ auf PS.

Diese Formel gibt direkt die Maschinenleistung bei einfachwirkenden und einzylindrigen Maschinen. Bei doppeltwirkenden und bei mehrzylindrigen Maschinen hat man die Leistung jeder Zylinderseite und jedes Zylinders zu bilden und die einzelnen Leistungen zusammenzuzählen. Bei Gasmotoren mit Viertaktbetrieb dagegen hat man zu beachten, daß nur bei jedem zweiten Hingang des Kolbens eine Zündung erfolgt, nur die Hälfte der Hübe liefert Arbeit. Daher hat man $\frac{n}{2}$ statt n in jene Formel einzuführen.

Wir haben oben mit F die „wirksame" Kolbenfläche bezeichnet. Für ihre Berechnung ist die Gestaltung des Kolbens, etwa das Vorhandensein

einer Kolbenmutter (Fig. 142 links) ohne Einfluß. Die wirksame Kolbenfläche ist $\frac{D^2\pi}{4}$, wo D den Zylinderdurchmesser bedeutet, nicht den Kolbendurchmesser, der meist kleiner ist. Wenn aber eine Kolbenstange durch eine Stopfbüchse hindurch nach außen geht (Fig. 142 rechts), so ist die Fläche der Kolbenstange abzuziehen, auf sie wirkt p_m nicht ein, es ist hier $\frac{D^2\pi}{4} - \frac{d^2\pi}{4}$ die wirksame Kolbenfläche. Die Kolbenfläche ist also vorn und hinten verschieden. — Bei Plungerkolben ist $\frac{D^2\pi}{4}$ die wirksame Kolbenfläche, wo D der Plungerdurchmesser.

Der Maschinenhub ist gleich dem doppelten Kurbelradius nur dann, wenn kein Spiel in Kreuzkopf- und Kurbellager vorhanden ist. Differenzen von einigen Millimetern zwischen dem wirklichen Hub und dem der Zeichnung entnommenen kommen vor. Der Zylinderdurchmesser ist bei alten Maschinen, der Abnutzung wegen, stets größer als in der Zeichnung angegeben. — Bei schwungradlosen Maschinen, Duplexpumpen und dergleichen, ist der Hub wechselnd, zumal abhängig von der Tourenzahl. Man bestimmt am besten das Verhältnis der Diagrammlänge zur Hublänge durch Ausmessen, nicht aus den Abmessungen der Reduktionstrommeln. Dies Verhältnis ändert sich aber der Schnurdehnung wegen bei verschiedenen Tourenzahlen.

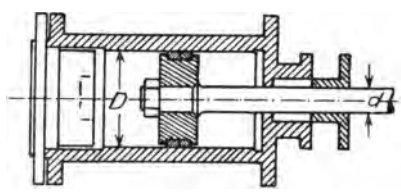


Fig. 142.

Geht eine Maschine sehr gleichmäßig, so genügt es, jedesmal einzelne Diagramme zu nehmen. Wo aber die einzelnen Diagramme nicht identisch sind, da muß man immer mehrere, fünf bis zehn, Diagramme auf ein Blatt nehmen, um einen brauchbaren Mittelwert der Diagrammfläche zu bekommen. — Die Ermittelung der Diagrammfläche geschieht meist mit dem Planimeter, Kap. V.

154. **Auswertung bei Dauerversuchen; Zylinderkonstante; Beispiel.** Es könnte einfacher scheinen, statt erst h_m und dann den mittleren Druck p_m zu berechnen, und nun die Formel $N_i = \frac{F \cdot p_m \cdot s \cdot n}{60 \cdot 75}$ anzuwenden, die ganze Rechnung durch eine einzige Formel zu erledigen, welche direkt die gemessenen Größen: Federmaßstab, Diagrammlänge usw., enthalten würde.

Der angegebene Rechnungsgang ist aber allgemein üblich und sehr zweckmäßig. Die Rechnung wird übersichtlicher, außerdem ist p_m eine zur Beurteilung der Maschine oft brauchbare Größe, die man gerne kennt. Besonders aber spart die Berechnungsweise viel Arbeit, sobald es sich um Auswertung einer großen Anzahl von Diagrammen handelt, die fortlaufend,

etwa von 5 zu 5 Minuten, aufgenommen wurden und aus denen man für eine längere Versuchsdauer die durchschnittlich indizierte Leistung finden will.

Da weder die Diagrammlänge, noch der Inhalt, noch selbst die Tourenzahl der Maschine ganz konstant bleibt, so müßte man korrekterweise aus jedem Diagramm das momentane p_m ermitteln, und unter Benutzung der momentanen Umlaufzahl die momentane Leistung finden. Aus allen diesen Leistungen hätte man dann den Durchschnittswert zu bilden. Das wäre sehr zeitraubend. Statt dessen rechnet man bequemer mit dem Durchschnittswert aller p_m und mit der durchschnittlichen Umlaufzahl und hat nur eine Rechnung auszuführen statt vieler. Daß solche Rechnungsweise ungenaue Ergebnisse liefert, ist im § 11 besprochen worden. Aber die Einzelwerte von p_m und von n pflegen so wenig zu variieren, daß man ruhig das Produkt der Mittelwerte mit dem Mittelwert der Produkte verwechseln kann.

Man kann die Rechnung oft noch weiter vereinfachen: Man kann gleich den Durchschnittswert der Diagrammflächen und den der Längen bilden, und den Durchschnittswert aller p_m durch einmaliges Bilden des Quotienten erhalten, statt p_m für jedes Diagramm zu berechnen. Das ist nicht ganz so oft zulässig. Auch die Kolbenflächen eines doppeltwirkenden Zylinders sind bei größeren Maschinen so wenig voneinander verschieden, daß man eine mittlere Kolbenfläche F_m, Mittel aus vorn und hinten, einführen und so gleich die Gesamtleistung des Zylinders finden kann; man verwendet dann die Formel $N_i = 2 \cdot \frac{F_m \cdot p_m \cdot s \cdot n}{60 \cdot 75}$, wo die zwei die doppelte Wirkung des Zylinders in Rechnung zieht.

Zweckmäßig ist es, alle diejenigen Größen zur sogenannten Zylinderkonstanten zusammenzufassen, welche von den Dimensionen und der Eigenart der Maschine abhängen. Die Zylinderkonstante ist ein Analogon zur Bremskonstanten beim Pronyschen Zaum und der Seilbremse. Es ist also $N_i = C \cdot p_m \cdot n$. Dabei ist $C = 2 \cdot \frac{F_m \cdot s}{60 \cdot 75} = \frac{(F_v + F_h) \cdot s}{60 \cdot 75}$ für doppeltwirkende; $C = \frac{F \cdot s}{60 \cdot 75}$ für einfachwirkende; $C = \frac{1}{2} \cdot \frac{F \cdot s}{60 \cdot 75}$ für einfachwirkende Viertaktmaschinen.

All dieses wird durch ein Beispiel am besten veranschaulicht werden.

Beispiel: Doppeltwirkende Einzylindermaschine, Zylinderdurchmesser 300 mm, Kolbenstangendurchmesser 35 mm, Hub 400 mm. Federmaßstab vorn 8,1 mm = 1 at; hinten 7,8 mm = 1 at. Durch Indizieren in Abständen von je 10 Minuten fand man:

Diagrammflächen in qmm	vorn	1130	1170	1140	1120	1110	1120
	hinten	1200	1280	1200	1170	1160	1180

Diagrammlängen in mm	vorn	102,5	103,1	102,9	103,2	103,2	103,5
	hinten	100,1	101,0	100,9	101,0	101,2	101,3
Umlaufzahlen n		75,2	75,5	75,1	74,7	74,5	75,0

Daraus folgt für jedes einzelne Diagramm die mittlere Höhe

vorn h_m	11,02	11,33	11,08	10,83	10,75	10,81
hinten h_m	11,99	11,98	11,90	11,58	11,46	11,63

und im Mittel hieraus die Werte $h_m = 10{,}95$ mm für vorne, $h_m = 11{,}74$ mm für hinten. Mit Hilfe der Federmaßstäbe findet man vorne den mittleren Überdruck des Diagramms $p_m = 1{,}352$ at und hinten $p_m = 1{,}506$ at. Aus den Zylinderabmessungen ergibt sich die Zylinderkonstante vorne $C = \frac{697{,}3 \cdot 0{,}4}{60 \cdot 75} = 0{,}0620$ und hinten $C = \frac{706{,}9 \cdot 0{,}4}{60 \cdot 75} = 0{,}0628$. Mit der mittleren Umlaufzahl $n = 75{,}0$ wird die Leistung vorne $N_v = 6{,}30$ PS_i und hinten $N_h = 7{,}08$ PS_i, insgesamt $N = 13{,}38$ PS_i.

Statt dessen ist es viel einfacher und meist ausreichend, summarisch wie folgt zu rechnen: Diagrammfläche, Mittel aus allen Diagrammen vorn und hinten 1160 qmm; Diagrammlänge ebenso 102,0 mm; also im Mittel $h_m = 11{,}38$ mm. Federmaßstab, Mittel aus vorn und hinten 7,95 mm = 1 at, also im Mittel $p_m = 1{,}431$ at Zylinderkonstante, Summe aus vorn und hinten $C = 0{,}1248$. Also wird $N = 13{,}40$ PS_i.

Diese vereinfachte und viel Zeit sparende Methode darf man nur dann anwenden, wenn die Größen, aus denen man die Mittel nimmt, nicht allzu sehr voneinander abweichen (§ 11). Nie dürfte man beispielsweise auf den Gedanken kommen, bei Berechnung der Leistung einer Verbundmaschine eine mittlere Zylinderkonstante für Hoch- und Niederdruckzylinder zu bilden; hier ist unbedingt die Leistung jedes einzelnen Zylinders zu bilden.

155. **Beschreibung von Indikatoren.** Fig. 143 und 144 geben zwei Indikatorformen, die in vielen Einzelheiten voneinander abweichen, nach Rosenkranz und nach Crosby. Andere Konstruktionen pflegen in den Einzelheiten mit dem einen dieser beiden übereinzustimmen.

In beiden Fällen ist das sogenannte Schreibzeug, bestehend aus Deckel, Kolben, Feder und einer Reihe von Geradführungsgliedern, abnehmbar durch Lösen des Deckels. Der Indikatorzylinder mit der Papiertrommel bleibt dann an der Maschine. Die Feder ist am Deckel angeschraubt. Am Kolben ist sie bei Rosenkranz ebenso eingeschraubt wie am Deckel, bei Crosby ist sie durch ein Kugelgelenk mit dem Kolben vereinbar, die Kugel sitzt an der Feder, die Kugelpfannen werden durch Kolben und Kolbenstange gebildet. Die Kugellagerung soll keinen toten Gang haben, aber nicht festgeklemmt sein, dann ist sie sicher der anderen Konstruktion überlegen, weil die Feder den Kolben nie einseitig drücken kann. Kolbenstange und die äußeren Schreibhebel sind bei Crosby durch ein langes Gewinde in der Kolbenstange, bei Rosenkranz durch eine Überwurfmutter mit Kugel-

lagerung verbunden. Erstere Anordnung gestattet die Atmosphärenlinie in verschiedene Höhenlage zu bringen indem man das Gewinde mehr oder weniger in die Kolbenstange hineinschraubt; diese Einrichtung ist ganz überflüssig, die Kugelverbindung ist sicher die bessere.

Die Schreibhebelanordnung eines Indikators soll Geradführung und Proportionalität erzielen. Die Anordnung der Glieder soll so sein, daß der Schreibstift auf der stillstehenden Papiertrommel eine senkrechte Gerade beschreibt; und ferner so, daß die Kolbenbewegung überall gleich stark vergrößert wird, daß also für alle Teile des Hubes, oben und unten, die Schreibstiftwege den Indikatorkolbenwegen proportional seien. Die Vergrößerung der Kolbenbewegung ist meist eine sechsfache. — Der Rosenkranz-Indikator hat das Schreibstiftgetriebe, Fig. 145. Seine Wirkungsweise erläutert Fig. 146. Führt man ein Glied AB so, daß Punkt A eine wagerechte, B eine senkrechte Gerade beschreibt, so beschreiben bekanntlich alle Punkte des Gliedes Ellipsen, speziell der Mittelpunkt C von AB beschreibt einen Kreis um M. Das Umgekehrte ist beim Indikatorgetriebe der Fall (Fig. 147): Der Gegenlenker MC führt C im Kreise um M, der sogenannte Evanssche Lenker AD führt A fast genau auf einer wagerechten

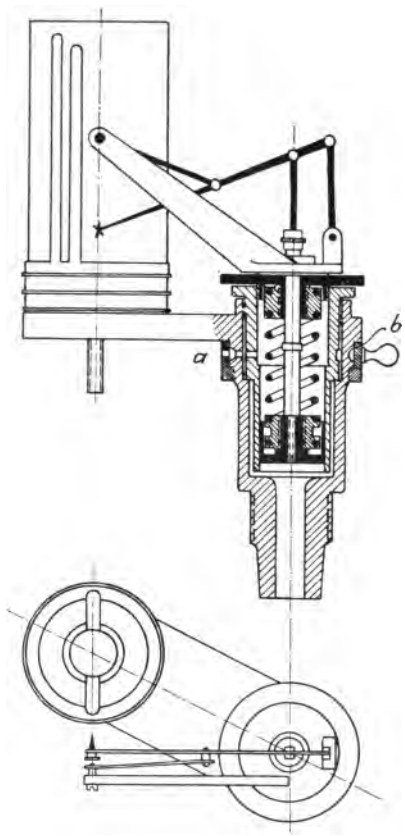


Fig. 143. Rosenkranz-Indikator.

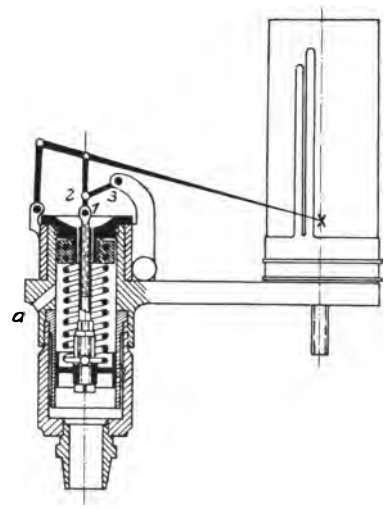


Fig. 144. Crosby-Indikator.

Geraden: also muß Schreibstift S eine senkrechte Gerade fast genau beschreiben. Die Kolbenbewegung greift am Kugelgelenk K an: Proportionalität der Bewegungen von K und S wird bestehen, wenn K auf der Verbindungslinie SD liegt, man kann dann das bekannte Storchschnabelgetriebe einzeichnen (Fig. 148), welches ja bekanntlich Proportionalität ergibt. — Das Getriebe des Crosby-Indikators gibt theoretisch ebenfalls eine gute Geradführung und für die Proportionalität gilt auch hier die Regel: SKD in gerader Linie. Konstruktiv ist es ein Nachteil, daß die Gelenke *1*, *2* und *3* (Fig. 144) dicht aneinander liegen, so daß ein geringer toter Gang im Schreibstift stark übersetzt erscheint. Das Crosby-Getriebe ist aber leichter und deshalb für hohe Tourenzahlen besser (§ 167).

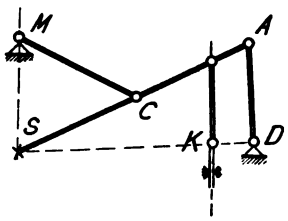


Fig. 145.

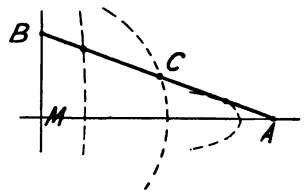


Fig. 146.

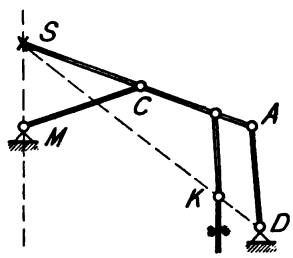


Fig. 147.

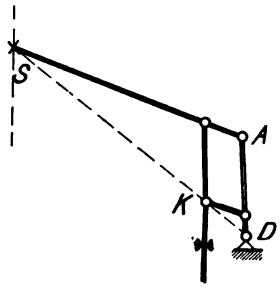


Fig. 148.

Die Löcher a (Fig. 143 und 144) bei beiden Konstruktionen sorgen dafür, daß Dampf, der durch Undichtigkeiten des Kolbens hindurchtritt, ins Freie geht, so daß über dem Kolben stets atmosphärische Spannung herrscht; sie müssen groß sein. Der Ring b über den Löchern bei Rosenkranz, der dem Dampf eine gewünschte Richtung gibt, ist verwerflich, weil er so großen Widerstand verursacht, daß über dem Kolben Überdruck entsteht, wenn der Kolben undicht ist. Der Kolben soll aber lieber zu leicht als zu schwer spielen, denn Reibung ist schädlicher als Dampfverlust.

156. **Kaltfederindikator.** Während die soeben genannten Formen bis vor wenigen Jahren allgemein benutzt wurden, hat man in den letzten Jahren erkannt, daß die Lage der Feder im Innern des Gehäuses eine äußerst ungünstige ist, sobald der Indikator beim Indizieren

warm wird, wie das bei der Dampfmaschine stets, bei der Gasmaschine und bei Kompressoren immer dann der Fall ist, wenn der Indikatorstutzen nicht durch einen Kühlmantel hindurchgeht. Die Feder wird nämlich mit zunehmender Temperatur bedeutend nachgiebiger; da man ihre Temperatur beim Indizieren nicht kennt, so kennt man auch nur annähernd den Federmaßstab, der für die Berechnung maßgebend ist. Die Unsicherheit beträgt leicht mehr als 2 %.

Diesen Übelstand sucht man durch die Konstruktion von Kaltfederindikatoren zu beheben. Von den zahlreichen neuerdings aufgetauchten Formen nennen wir den Willner-Indikator, fabriziert von H. Maihak in Hamburg (Fig. 149). Man erkennt, wie die Feder bei ihm auf Zug statt bisher auf Druck beansprucht wird, und daß sie völlig kühl liegt, zumal die drei Säulen *a* durch eine Isolierung gehindert werden, die Wärme direkt weiterzugeben. Das gesamte Schreibzeug ist nach oben herauszuziehen, gerade wie beim Warmfederinstrument, das Auswechseln der Federn ist ähnlich wie bei diesem. Als Vorzug ist besonders anzuführen, daß der Raum über dem Kolben ganz offen ist, so daß sich nie Überdruck in ihm ansammeln kann. Ein mehr äußerlicher Vorzug ist es auch, daß der Deckel bei *b*, wo man ihn losschraubt, aus isolierendem Material besteht, so daß man sich beim Anfassen nicht verbrennt. — Der Nachteil hingegen ist, daß die beträchtliche Kraft, welche auf den Kolben wirkt — bis zu 50 kg — nicht direkt von der Feder aufgenommen wird, sondern erst durch die schwache Kolbenstange hindurchtreten muß: diese knickt und es entsteht Klemmung. Dieser Übelstand haftet allen Kaltfederinstrumenten an und gereicht manchen Konstruktionen geradezu zum Verderben; er ist bei dem in Rede stehenden Instrument wenigstens durch geschickte Konstruktion auf ein erträgliches Maß gebracht.

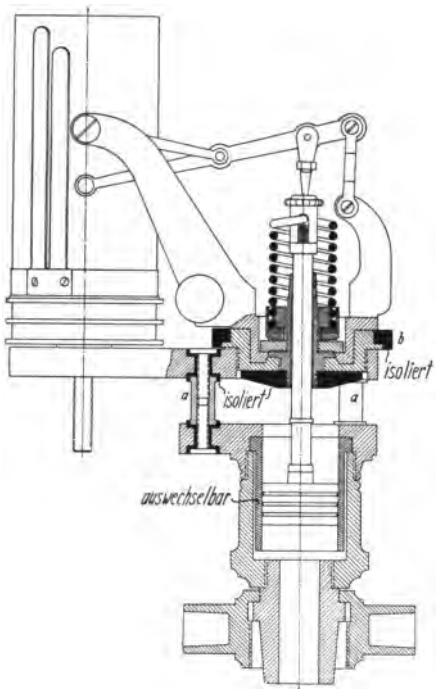


Fig. 149. Willner-Indikator.

Nach dem heutigen Stande der Fabrikation empfehlen wir die Verwendung eines Kaltfederinstrumentes überall, wo der Indikatorzylinder warm

wird. In allen anderen Fällen ist ohne Zweifel ein gewöhnliches Instrument vorzuziehen, es geht stets leichter. Handelt es sich um Beschaffung nur eines Indikators für alle Zwecke, so dürfte vielleicht der Kaltfederindikator vorzuziehen sein.

157. **Zubehörteile; Praktisches.** Jede Maschine hat an den Zylinderenden Indikatorstutzen. An diese wird der Indikatorhahn, und daran der Indikator selbst angeschraubt. Der Weg vom Maschinenzylinder zum Indikator soll kurz, weit und möglichst geradlinig sein, damit die Druckschwankungen richtig in den Indikatorzylinder hineinkommen.

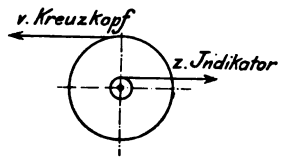


Fig. 150.

Außerdem hat man den Antrieb der Indikatortrommel vom Kreuzkopf aus zu bewirken. Fast immer muß man die Kreuzkopfbewegung in verkleinertem Maßstab der Trommel mitteilen. Die Verkleinerung geschieht durch Hubverminderer (Reduktoren). Diese bestehen meist aus einem Rollenpaar mit gemeinsamer Achse: die größere Rolle wird vom Kreuzkopf aus angetrieben, von der kleineren entnimmt man die Trommelbewegung (Fig. 150). Im Innern der großen Rolle ist eine Feder zum Zurückführen, wie in der Indikatortrommel. Die kleine Rolle ist auswechselbar; man wählt sie um so kleiner, je größer der Maschinenhub ist. Solche Hubverminderer sind als Zubehörteile zum Indikator fertig käuflich. Sie sind entweder an den Indikator selbst anzuschrauben, oder an das Maschinengestell anzuklemmen. Erstere Anordnung hat den Nachteil, daß die ganze Kombination: Indikator und Hubminderer, leicht mit dem Maschinenhube hin und her schwankt; das stört die korrekte Übertragung der Bewegung. Man steife den Indikator nötigenfalls ab. Die Verminderungsrollen zum Anschrauben ans Maschinengestell können stabiler gearbeitet sein und deformieren sich nicht.

Bisweilen verwendet man zum Reduzieren der Bewegung Hebelanordnungen: diese geben nicht immer eine korrekte Bewegung, nicht immer sind die reduzierte und die unreduzierte Bewegung einander proportional. Toter Gang in den Gelenken ist recht störend. — Bei allen Hubminderern ist beim Anbau darauf zu achten, daß vom Minderer zum Indikator nur eine kurze Schnurführung sei; vergleiche hierüber § 165.

Fig. 151.

Man muß die Schnur im Gange der Maschine ein- und aushängen können, um das Papier auf der Trommel auszuwechseln. Bei kleinen Tourenzahlen kann man einen gewöhnlichen Haken über einen am Kreuzkopf befestigten Mitnehmer hängen. Bei Tourenzahlen über 100 Min. wird das Einhängen schwierig. Man verwendet den Schnapphaken, Fig. 151, der über den Mitnehmer *A* hinüberschnappt. Häufig haben die Indikatortrommeln eine Anhaltevorrichtung,

welche die obere Hälfte der Trommel von der unteren und dem Schnurtrieb abkuppelt, so daß man Papier aufspannen kann, während die Schnur hin und her läuft.

Meist treibt man den Indikator eines Zylinderendes vom Hubverminderer, den des anderen Zylinderendes von der Trommel des ersten Indikators aus an. Noch mehr Indikatoren schalte man nicht in dieser Weise hintereinander, die Schnüre werden zu stark gespannt und reißen oft ab.

Nach dem Anbauen und öfter während des Betriebes überzeuge man sich durch Anlegen des Fingers, ob Trommeln und Minderungsrolle nicht gegen eine ihrer Hubbegrenzungen stoßen. Die Bewegungsumkehr am Hubende muß sanft und ohne Stoß erfolgen. Im Diagramm macht sich das Anstoßen kenntlich, wie Fig. 152 zeigt. — Man mache sichs zur Regel, erst die Minderungsrolle, dann den ersten Indikator, endlich den anderen korrekt in Gang zu bringen, in der Reihenfolge also wie der Antrieb erfolgt. Die Bewegung der letzten Trommel stört man ja wieder, wenn man an der Minderungsrolle etwas ändert, usw.

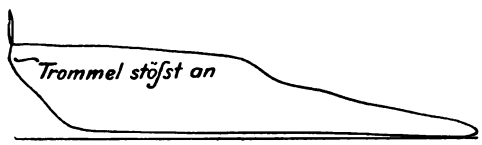


Fig. 152.

Der Indikatorkolben wird vor dem Einsetzen geölt. Nach der Benutzung ist selbstverständlich der ganze Indikator zu säubern und die Stahlteile, Feder und Kolbenstange, sind leicht zu ölen, um Rosten zu verhüten.

158. **Federmaßstab, Eichung.** Auf der Indikatorfeder ist der Federmaßstab angegeben. Diese Angabe ist eine glatte Zahl, und für genauere Versuche nicht ausreichend. Man muß vielmehr die Feder eichen und den Federmaßstab durch Versuch feststellen. Die Eichung kann auf zweifache Art geschehen.

Bei der Spannungseichung bringt man, von der atmosphärischen ausgehend, verschiedene Spannungen etwa in Stufen von 1 zu 1 Atmosphäre unter den Indikatorkolben und verzeichnet auf der Papiertrommel wagerechte Linien, deren Abstand man auf $^1/_{10}$ mm genau ausmißt. Daraus hat man direkt den Federmaßstab. Man führt eine Reihe Versuche bei steigendem, eine bei fallendem Druck aus; zwischen beiden Ergebnissen wird infolge der Reibung ein Unterschied bestehen, der nicht zu groß sein darf. Man nimmt aus beiden das Mittel.

Bei der Gewichtseichung belastet man den meist umgekehrt aufgestellten Indikator mit Gewichtsstücken. Dazu kann etwa die Vorrichtung Fig. 153 dienen, bei der die Gewichte unten angehängt werden. Wieder zieht man wagerechte Striche auf dem Indikatorpapier. Beim Auflegen der Gewichte gerät das ganze Gehänge in auf und ab gehende Schwingungen,

und durch diese Erschütterungen wird die Reibung beseitigt oder doch vermindert. Man klopfe auch noch gegen den Indikator. Im Betriebe ist ja die Reibung auch nur klein, weil die der Bewegung in Frage kommt.

Spannungs- sowohl wie Gewichtseichung kann kalt oder warm geschehen. Zur warmen Spannungseichung verwendet man Dampf, zur kalten Wasser- oder Kohlensäuredruck oder aber ein Kolbenmanometer (§ 117). Beider Gewichtseichung kann man den Indikator bei Bedarf mit Dampf anwärmen. Während früher die Frage, ob kalt oder warm zu eichen sei, eine große Rolle spielte, weil die Temperatur auf die Steifheit der Feder großen Einfluß hatte, beim Eichen aber die Gebrauchstemperatur nicht gerade zu erzielen war — so ist diese Frage heute dadurch erledigt, daß man für warmes Indizieren Kaltfederinstrumente benutzt. Die Veränderlichkeit der Feder kommt nun nicht mehr in Frage, die Vergrößerung der Kolbenfläche aber — etwa 0,4 % für 100° Temperaturzunahme — kann man rechnungsweise mit genügender Sicherheit berücksichtigen. Man eiche also kalt: einen Indikator, für welchen man kalt den Federmaßstab 8,20 mm = 1 at fand, wird bei einer geschätzten Temperatur von 100°

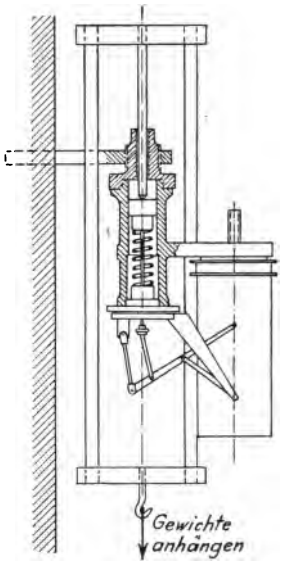


Fig. 153. Federeichapparat mit Gewichten.

den Federmaßstab $8{,}20\left(1-\frac{0{,}4}{100}\right)$ mm = 1 at; 8,16 mm = 1 at haben. Diese geringe und leidlich zuverlässige Korrektion darf man nicht verwechseln mit jenen großen, die man wohl zur Berücksichtigung warmer Federn angegeben findet, und die nur auf recht unsicheren Grundlagen zu beruhen pflegen.

159. **Mittlerer und wahrer Federmaßstab.** Bei der Eichung entsteht auf dem Papier ein Bild wie Fig. 154. Wir können es etwa Eichdiagramm nennen. Man erkennt, daß die Abstände der Linien nicht ganz gleichmäßig sind. Der Federmaßstab ist also nicht für alle Teile des Hubes der gleiche.

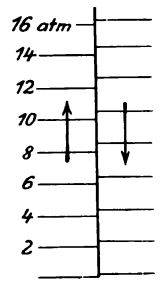


Fig. 154.

Berechnet man nun den Federmaßstab so, daß man den Abstand etwa der 4 at-Linie von der 12 at-Linie ausmißt und durch 12 − 4 = 8 teilt, so nennt man das Ergebnis den mittleren Federmaßstab zwischen 4 und 12 at. Diese Angabe läßt nicht erkennen, ob die Feder sich gleichmäßig zusammendrückte, so daß gleichen Druckintervallen überall gleiche Schreibstiftwege entsprachen. Etwas genauer wird die Angabe schon,

wenn wir den Federmaßstab zwischen 4 und 8, zwischen 8 und 12 at je getrennt angeben. Wir könnten dann vielleicht erkennen, daß die Feder bei hohen Spannungen steifer ist als bei niederen; das wäre ein Fehler, sie soll gleichmäßig und der Federmaßstab konstant sein. Je enger wir die Intervalle ziehen, desto besseren Aufschluß erhalten wir über die Gleichmäßigkeit der Feder. Den Federmaßstab, den wir aus einer unendlich kleinen Spannungszunahme und den zugehörigen unendlich kleinen Schreibstiftweg als Quotient beider errechnen, bezeichnet man als wahren Federmaßstab bei der betreffenden Spannung. In praxi muß man sich damit begnügen, den Federmaßstab für kleine, aber endliche Intervalle zu bestimmen und bezeichnet diesen dann als wahren Federmaßstab: eine 12 kg-Feder untersucht man etwa von Atmosphäre zu Atmosphäre, und bezeichnet den Abstand zwischen 3 at- und 4 at-Linie als wahren Federmaßstab bei $3^1/_2$ at — was annähernd zutrifft. Eine 2 kg-Feder untersucht man etwa von Viertel zu Viertel Atmosphäre.

Man rechnet im allgemeinen einfach mit dem mittleren Federmaßstab. Kommen im Diagramm eines Hochdruckzylinders Spannungen von 12 bis hinab zu 4 at vor, so mißt man im Eichdiagramm den Abstand zwischen der 4 at- und der 12 at-Linie aus, und teilt ihn durch $12 - 4 = 8$. Für Pumpendiagramme ist das ganz korrekt; andere Diagramme pflegen oben schmaler zu sein als unten, daher hat der Federmaßstab bei niederer Spannung mehr Einfluß als der bei hoher. Es ist meist überflüssig, hierauf Rücksicht zu nehmen. Arbeitet eine Feder sehr ungleichmäßig, so verwende man eine bessere. Muß man die Ungleichmäßigkeit berücksichtigen — bei Untersuchungen über die Form der Expansionskurven kann das nötig werden — so findet man in Z. V. D. I. 1902, S. 1583, eine Zusammenstellung der angewendeten Korrektionsverfahren.

Die größten Unregelmäßigkeiten geben schwache Federn. Die 2 kg-Federn vermeidet man am besten ganz. Namentlich findet man sehr große Unterschiede im Federmaßstab über und unter der Atmosphärenlinie. Man tut gut, die beiden getrennt festzustellen und im Diagramm die Flächen über und unter der at-Linie einzeln zu planimetrieren. Man findet eine mittlere Spannung aus der Fläche über der at-Linie und eine solche aus der Vakuumfläche. Die mittlere Spannung des ganzen Diagramms ist die Summe der einzelnen p_m.

160. **Gewichts- und Spannungseichung, warm und kalt.** Das Vorhandensein zweier Methoden für die Federeichung ist durch Vorzüge und Mängel beiderseits bedingt. In Deutschland zieht man neuerdings Gewichtseichung vor, die in Amerika ganz unbekannt ist. Gegen die Spannungseichung, an sich die näherliegende, wendet man ein, daß sie die Reibung im Indikator übertrieben groß erscheinen lasse und daß dadurch das Ergebnis getrübt werde. Beim Eichen nämlich komme die Reibung der Ruhe, im Betriebe aber die der Bewegung in Betracht, und letztere

ist bekanntlich kleiner. Im Betrieb ist der Indikator dauernd Erschütterungen ausgesetzt, welche die Reibung vermindern, und diese Erschütterungen werden durch die auf und ab gehenden Schwingungen bei der Gewichtseichung nachgeahmt. — Der Gewichtseichung wiederum wirft man namentlich die Unsicherheit vor, die bei der Messung des Kolbendurchmessers auftritt. Ein Irrtum von $^1/_{10}$ mm bedeutet einen Fehler von $^1/_2$% des Durchmessers, also 1% der Fläche. Freilich braucht solch großer Irrtum bei einer Mikrometermessung nicht unterzulaufen. Ferner ändert sich die Kolbenfläche mit der Temperatur, um 0,4% bei 100° Temperaturänderung; auch die Temperatur ist aber nur ungenau bekannt. Endlich soll der Kolben im Indikatorzylinder lieber zu leicht gehen und Dampf entweichen lassen, als große Reibung haben. Dann ist also der Zylinderdurchmesser größer als der des Kolbens und der enge Ringraum zwischen Kolben und Zylinder wäre wohl teilweise zum Kolben zu zählen. Jede einzelne dieser Unsicherheiten ist nicht gerade bedeutend, zusammen sind sie immerhin zu beachten.

Verfasser persönlich neigt mehr dazu, die Spannungseichung vorzuziehen, weil sie doch die Umstände des praktischen Betriebes besser annähert; im allgemeinen ist man neuerdings anderer Ansicht. Es scheint aber auch nicht ganz überflüssig zu sein, gelegentlich beide Eichungen anzuwenden: Man prüft durch Gewichtseichung die Gleichmäßigkeit der Feder; bei dieser Prüfung spielen Kolbendurchmesser und die anderen Unsicherheiten keine Rolle; und man stellt durch Spannungseichung den Federmaßstab fest; dabei braucht man nur zwei weit voneinander liegende Spannungen anzuwenden. Mit anderen Worten: Für Ermittlung des mittleren Federmaßstabes scheint die Spannungseichung die bessere zu sein, den Verlauf des wahren Federmaßstabes läßt die Gewichtseichung besser erkennen.

Legt man übrigens auf die Vorzüge der einen oder der anderen Art zu großes Gewicht, so schätzt man wohl die Genauigkeit des Indikators zu hoch ein. Der Unterschied zwischen beiden verschwindet bei nicht sehr sorgfältiger Behandlung des Indikators hinter anderen Fehlerquellen (§ 166).

161. **Versetzte Diagramme; Zeit- und Kurbelwegdiagramme.** Bisweilen nimmt man Diagramme auf, bei denen die Trommelbewegung nicht von der Kurbel abgeleitet wird, die zu dem betreffenden Zylinder gehört, sondern von einer um 90° versetzten Kurbel. Bei Verbundmaschinen leitet man die Trommelbewegung einfach vom anderen Kreuzkopf aus ab. Der Totpunkt liegt dann in der Mitte des Diagramms. Solche versetzten Diagramme lassen den Diagrammverlauf in der Nähe des Totpunktes besser erkennen als das gewöhnliche, das nahe dem Totpunkt stark verkürzt ist, weil die Trommel sich da langsam bewegt. Für Meßzwecke haben versetzte Diagramme keine Bedeutung. — Das gleiche gilt von Zeitdiagrammen. Bei diesen wird ein Papierstreifen gleichmäßig abgewickelt, nicht hin und her bewegt: der Schreibstift des Indikators verzeichnet den zeitlichen

Verlauf der Spannung. Man kann auch den zeitlichen Verlauf der Spannung auf einer einfach rotierenden Trommel aufzeichnen lassen. Auch die Zeitdiagramme dienen nicht zur Arbeitsermittlung, sind indes sehr lehrreich für Untersuchung der Vorgänge im Maschinenzylinder. — Bei Kurbelwegdiagrammen wird der Papierstreifen nicht von einem Uhrwerk gleichmäßig, sondern von der Maschinenwelle bewegt, also kommt die Ungleichförmigkeit der Maschine ins Diagramm hinein. Sonst stimmen sie mit den Zeitdiagrammen überein.

Nachdrücklich bemerken wir, daß die mittlere Höhe, welche man aus einer der eben genannten Diagrammarten ermittelt, nicht die gleiche ist wie die früher zur Arbeitsberechnung benutzte. Man kann daher aus solchen Diagrammen die Arbeit nur auf Umwegen berechnen. Die Diagrammfläche stellt nur dann die Arbeit dar, wenn die Kolbenkräfte als Funktion der Kolbenwege aufgetragen sind. Ermittelt man durch Umzeichnen des Zeitdiagramms aus ihm die Leistung der Maschine, so hat man den Vorteil, die Schnurdehnungsfehler zu vermeiden, von denen wir in § 165 sprechen werden. Für genaue Ermittlungen kann also das umständliche Umzeichnen in Frage kommen.

162. **Störung des Maschinenganges durch den Indikator.** Bei kleinen Maschinen und bei solchen, deren schädlicher Raum sehr klein ist (Kompressoren, Corlißdampfmaschinen) wird der Maschinengang durch den Anbau des Indikators wesentlich geändert. Die Diagramme geben dann nicht praktische Betriebsverhältnisse wieder und man muß in allen Folgerungen vorsichtig sein.

Der Maschinengang ändert sich zunächst dadurch, daß der Raum unter dem Indikatorkolben zum schädlichen Raum kommt; eine Maschine mit sonst 1% schädlichem Raum hat nun etwa $1\frac{1}{4}$%. Das Diagramm stellt daher, wenn auch nicht exakt die Betriebsverhältnisse unserer Maschine, so doch wenigstens mögliche Verhältnisse dar. Außerdem aber gibt der sich bewegende Indikatorkolben durch seine Bewegung zu verschiedenen Zeiten mehr oder weniger Raum frei: dieser Raum muß mit dem arbeitenden Medium, z. B. mit Wasser bei einer Pumpe, angefüllt werden. Daher wird gewissermaßen der schädliche Raum veränderlich: er ist abhängig von der Spannung im Zylinder. Das sind Verhältnisse, die praktisch unmöglich sind; höchstens mit dem Atmen eines Pumpenkörpers läßt die Erscheinung sich vergleichen.

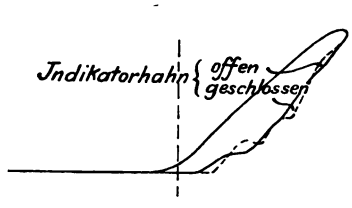


Fig. 155. Einfluß des Indikators auf ein versetztes Ventildiagramm.

Wie sehr die Betriebsverhältnisse einer Pumpe durch den Indikator geändert werden können, zeigen die versetzten Ventilerhebungsdiagramme (Fig. 155, nach Z. V. D. I. 1904, S. 1185), deren eines bei offenem,

deren anderes bei geschlossenem Indikatorhahn aufgenommen ist. Bei offenem Indikatorhahn hebt sich das Ventil später vom Sitz, weil das Wasser erst den vom Indikatorkolben frei gegebenen Raum ausfüllen muß; der Pumpengang wird also durch den Indikator verschlechtert. Auch der volumetrische Wirkungsgrad wird verschlechtert.

163. **Massenschwingungen des Kolbens.** Auf den Kolben des Indikators wirkt von unten her die Spannung im Zylinder. Wir wollen den von ihr ausgeübten Druck als Kolbenkraft bezeichnen. Von oben wirkt die Kraft der Feder auf den Kolben. Der Schreibstift stellt sich so ein, daß Kolbenkraft und Federkraft einander gleich sind.

Wenn sich die Spannung unter dem Indikatorkolben ändert, so folgt der Kolben und also auch der Schreibstift dieser Änderung nicht momentan; die Masse des Kolbens kann ja erst dadurch in Bewegung gesetzt werden, daß die Federkraft, also die Schreibstiftstellung, nicht mehr der durch die Spannung unter dem Kolben erzeugten Kolbenkraft entspricht; der Unterschied ΔP zwischen Feder- und Kolbenkraft setzt die Kolbenmasse m mit der Beschleunigung p in Bewegung: $p = \frac{\Delta P}{m}$. Solange eine Beschleunigung stattfindet, ist die Stellung des Schreibstifts nicht die, welche nach den Ergebnissen der Eichung der momentanen Kolbenkraft entspricht.

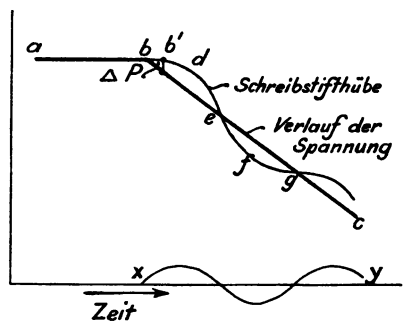


Fig. 156.

Um die Vorgänge zu verfolgen, wollen wir den einfachen Fall annehmen, daß die Spannung unter dem Kolben bisher, von a bis b (Fig. 156) konstant gewesen sei, weiterhin aber, von b bis c, in der Zeiteinheit um immer gleichviel abnehme; der zeitliche Verlauf der Spannung sei also durch $a\,b\,c$ gegeben. Der Indikator sei reibungsfrei. Zu jedem Zeitpunkte ist die Kolbenkraft durch die Spannung unter dem Kolben; also durch $a\,b\,c$, bestimmt; die Federkraft aber durch die momentane Stellung des Schreibstifts. Da im Punkte b eine beschleunigende Kraft für die Kolbenmasse noch nicht vorhanden ist, so geht der Schreibstift noch in wagerechter Richtung weiter; dadurch bildet sich die erwähnte Differenz ΔP zwischen Kolbenkraft und Federkraft, letztere überwiegt um den durch die angedeutete Strecke ΔP jederzeit gegebenen Betrag; ΔP beschleunigt die Kolbenmasse so, daß die Federkraft bei d ebenso schnell sinkt wie die Kolbenkraft; da aber die Federkraft bei d noch größer ist als die Kolbenkraft, so findet eine weitere Beschleunigung der Kolbenmasse statt; die Federkraft fällt nun schneller als die Kolbenkraft, und bei e werden beide Kräfte einander gleich sein, eine Beschleunigung findet dort nicht mehr statt. In e ist

nun aber die Geschwindigkeit des Kolbens größer, als der Abnahme der Spannung unter ihm entspricht, und infolge seiner Masse behält er die Geschwindigkeit bei; er schießt über sein Ziel hinaus, wie Kurve ef angibt, dadurch beginnt sofort die Kolbenkraft die größere zu werden; ΔP wird negativ und verzögert die Kolbenmasse; alles tritt umgekehrt wie vorher ein, bei g werden beide Kräfte gleich; dort ist aber die Kolbengeschwindigkeit Null, wie bei b, die Kurve läuft wagerecht, und das Spiel beginnt von neuem.

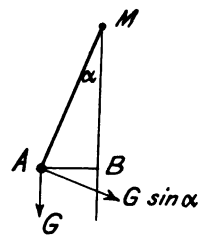


Fig. 157.

Den Charakter der Kurve $bdefg$ erkennen wir aus folgender Erwägung: Die beschleunigende Kraft ΔP ist proportional dem Abstande der Kurve $bdefg$ von den Geraden bec; das ist wie beim mathematischen Pendel AM (Fig. 157), wo die beschleunigende Kraft des Gewichts G durch die Komponente $G \cdot \sin\alpha$ gegeben, also stets proportional $\overline{AB}$ ist. Aus der Mechanik ist bekannt, daß der zeitliche Verlauf der Abstände $\overline{AB}$ durch eine Sinuslinie dargestellt wird. So wird denn auch der zeitliche Verlauf der Größe ΔP durch eine Sinuslinie xy (Fig. 156) dargestellt sein, und die Kurve $bdefg$ ist durch Übereinanderlagerung dieser Kurve mit der Geraden bc zu erhalten, d. h. durch Aufaddieren der einzelnen Ordinaten. Die Schwingungen setzen sich unendlich lange in unveränderter Größe fort, wie ja das reibungsfreie mathematische Pendel unendlich lange schwingt.

Nun übt aber die bisher vernachlässigte Reibung eine dämpfende Wirkung aus; sie verändert die Kraft ΔP stets so, daß ein Verlust von Schwingungsenergie eintritt. Die Amplitude der Schwingungen nimmt ab, und schließlich fallen die Schwingungen ganz fort.

Im Dampfmaschinendiagramm (Fig. 158) ist nun dieser Verlauf der Spannung nach der Linie abc etwa verwirklicht. Die zuerst starken Schwingungen sind bei c verschwunden.

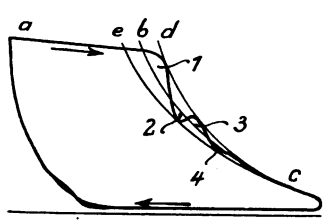


Fig. 158.

Wenn wir mittels des Indikators ein Diagramm wie Fig. 158 erhalten haben, so können wir die beiden Kurven cd und ce so ziehen, daß sie überall die durch Federschwingungen erzeugten Wellen berühren; die wahre Spannungskurve war dann die Kurve cb, die Mittelkurve aus cd und ce. Oder aber man zieht, von c beginnend, freihändig mit meist ausreichender Genauigkeit eine Kurve cb von möglichst stetiger Krümmung durch die Federschwingungen so hindurch, daß die zu beiden Seiten der neugezogenen Kurve liegenden Flächenteilchen gleichmäßig größer und größer werden. Der Punkt b wäre als Expansionspunkt

des Diagramms anzusprechen. Auch in der Kompressionskurve sieht man Schwingungen.

Im allgemeinen wird angenommen, daß die Diagrammfläche durch Federschwingungen nicht geändert wird. Diese Annahme ist offenbar falsch: der Schreibstift hatte zunächst das Diagramm um die Fläche *1* zu groß gezeichnet; er zeichnet es weiterhin um die Fläche *2* zu klein; da aber *1* größer als *2* ist, so bleibt ein Zuviel bestehen; weiterhin ist *3* größer als *4*, auch hier bleibt ein Überschuß; und so fort. Da durch Zusammenfassen je zweier Flächen stets Überschüsse erhalten werden, so wird auch im ganzen durch die Federschwingungen eine Veränderung der Diagrammfläche herbeigeführt worden sein.

Man sollte also durch die Federschwingungen hindurch die Ausgleichskurve legen und dann erst planimetrieren. Das ist oft zu umständlich; man planimetriert einfach das mechanisch aufgezeichnete Diagramm. Der Fehler durch dieses Verfahren dürfte nie unzulässig groß werden.

Will man den Charakter der Expansionskurve studieren, nicht nur die Arbeit ermitteln, so muß man die Schwingungen ausgleichen. Auch bei Anwendung der Simpsonschen Regel zur Flächenermittlung dürfte das nötig sein. Man könnte sonst lauter zu große Ordinaten fassen.

Wir haben in Fig. 156 als Abszissen die Zeiten aufgetragen, im Indikatordiagramm Fig. 158 tritt an ihre Stelle der Kolbenweg. Dadurch werden die Schwingungen an den Hubenden verkürzt wiedergegeben, doch bleiben unsere Überlegungen im übrigen richtig.

164. **Schwingungen als Zeichen eines guten Indikators.** Die Reibung bringt die Massenschwingungen allmählich zum Aufhören: ist sie stärker,

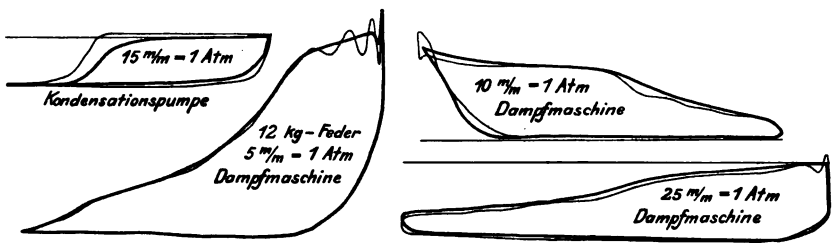


Fig. 159. Einfluß der Schreibstiftreibung auf das Diagramm.

so beseitigt sie dieselben ganz und verhindert sie im Entstehen. Eine Verbesserung des Diagramms ist das nicht, denn die Reibung kann die Angabe des Indikators wie jedes Meßinstrumentes nur fälschen. In welchem Maße das der Fall sein kann, zeigt Fig. 159[1]): Kurz nacheinander sind zwei Diagramme aufgenommen, bei dem einen wurde der Schreibstift sehr

[1]) Die in Fig. 159 eingetragenen Federmaßstäbe beziehen sich auf das ursprüngliche Diagramm; in der Figur ist dasselbe linear auf die Hälfte verkleinert.

schwach ans Papier gedrückt, beim anderen kräftiger. Das zweite Diagramm ist falsch, und man würde aus diesem schöner aussehenden Diagramm die Arbeit falsch ermitteln. Die Tatsache ist allbekannt, über die Größe des verursachten Fehlers wird man indes erstaunen.

Die Massenschwingungen sind in der Wirkungsweise des Indikators begründet und nur durch Reibung, zu enge Bohrung im Indikatorstutzen und andere die Wirkung des Instrumentes störende Maßnahmen zu beseitigen. Ein gutes Diagramm muß Schwingungen aufweisen, es sei denn bei sehr kleiner Umlaufzahl oder mit sehr starker Feder geschrieben.

Die Massenschwingungen werden um so kräftiger, je höher die Umlaufzahl der Maschine ist; je größer die Masse der bewegten Teile, Indikatorkolben, Kolbenstange und Schreibzeug, ist; je schwächer die Feder ist und je plötzlicher die Spannungsänderungen im Indikatorzylinder von

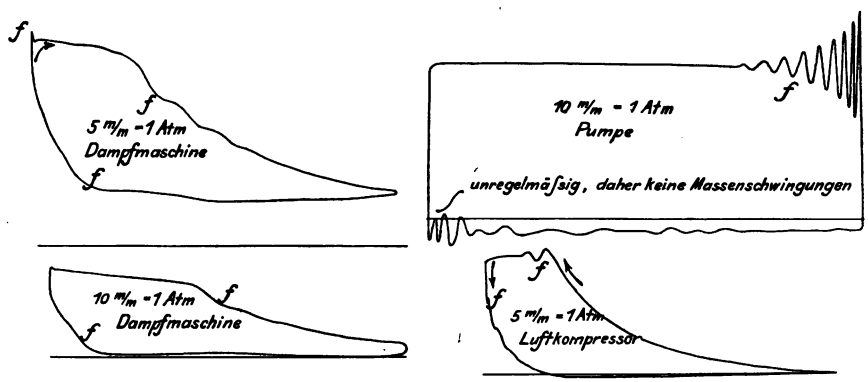


Fig. 160. Massenschwingungen.

statten gehen. Diese Sätze werden belegt durch eine Reihe von Diagrammen, Fig. 160[1]), welche dazu beitragen werden, die Federschwingungen von Störungen im Indikator- oder Maschinengang, mit denen sie oft verwechselt werden, zu unterscheiden: der gleichmäßige Verlauf macht sie kenntlich. Wir bemerken zu den Figuren: Die Schwingungen, überall mit *f* bezeichnet, treten immer nach einem plötzlichen Richtungswechsel im Diagramm auf. Im Dampfmaschinendiagramm findet man sie am Beginn der Expansionslinie, schwächer am Beginn der Kompressionslinie, oft am Ende der Voreinströmung. Im Kompressordiagramm sind sie stets geringer, weil die Kompressionslinie allmählich zu steigen beginnt, kleine Haken finden sich wohl in der Expansionslinie. Auffallend sind die deutlich erkennbaren Schwingungen in Fig. 159 unten rechts, wo doch die

[1]) Die in Fig. 160 eingetragenen Federmaßstäbe beziehen sich auf das ursprüngliche Diagramm; in der Figur ist dasselbe linear auf die Hälfte verkleinert.

Expansion so sanft einsetzt: die schwache Feder ist die Ursache, es handelt sich um das Diagramm eines Niederdruckzylinders. Gasmaschinendiagramme zeigen selbst nach der plötzlichen Drucksteigerung durch die Zündung nur wenige Schwingungen, weil die Feder stark zu sein pflegt. Besonders kräftig aber werden die Schwingungen im Pumpendiagramm, einmal weil in dem inkompressiblen Wasser Spannungsänderungen plötzlicher vor sich gehen als in den elastischen Gasen und Dämpfen, zum zweiten aber auch, weil beim Hin- und Hergang des Indikatorkolbens Wasser in dessen Zylinder und wieder heraustreten muß. Dessen Masse kommt zur Masse der bewegten Teile und vergrößert sie um so mehr, als in der engen Bohrung des Stutzens die Wassergeschwindigkeit eine größere ist.

165. **Wirkung der Trommelmasse.** Massenwirkungen treten außer beim Schreibzeug auch bei der Trommel des Indikators auf. Die Trommelbewegung ist ja keine zwangläufige, sondern eine kraftschlüssig erreichte: wenn die rückführende Feder nicht ausreicht, um die Trommel so stark zu beschleunigen, wie die Kolbenbewegung verlangt, so muß die Indikatorschnur schlaff werden. Wird die Schnur zeitweise entspannt, so ist die Trommelbewegung ganz unzulässig gefälscht, man muß Abhilfe schaffen durch Anspannen der Trommelfeder oder durch Vermindern des Trommelhubes.

Aber schon bevor es zur Entspannung der Schnur kommt, treten Veränderungen der Trommelbewegung auf dadurch, daß die Schnur dehnbar ist. Diese Dehnung beträgt einige Millimeter auf den Meter Schnurlänge und könnte unbedeutend scheinen. Man muß aber bedenken, daß bei einer Schnurlänge von 1 m und einer Dehnung von 5 mm diese ganze Dehnung im Diagramm von nur etwa 100 mm Länge in die Erscheinung tritt, dann würde also die Diagrammlänge um 5 % geändert werden. Man mache also alle Schnüre so kurz wie möglich.

In der Tat findet man, daß die Diagramme bei schnellerer Gangart der Maschine immer länger werden, eben weil die Papiertrommel beiderseits über ihr Ziel hinausschießt. Nun ist uns ja die Länge des Diagramms an sich gleichgültig, es kommt nur darauf an, daß Kreuzkopfbewegung und Trommelbewegung einander proportional bleiben. Wir sind zum Glück in der Lage zu zeigen, daß diese Bedingung trotz der Schnurdehnung erfüllt wird, solange natürlich die Schnur nicht zeitweise ganz schlaff wird. Erfüllt wird sie genau, sofern der Kreuzkopf eine reine Sinusbewegung ausführt, also bei unendlich langer Schubstange und genügend schwerem Schwungrade, und sofern man die Deformation der Trommelfeder und der Schnur proportional der deformierenden Kraft setzen kann. Sofern diese Bedingungen nur annähernd zutreffen, wird auch die Proportionalität nur annähernd gewahrt bleiben und bei schnellem Gang ganz verloren gehen.

In Fig. 161 sei als Abszisse die Zeit aufgetragen. Die Ordinaten der Kurve *1* stellen die Abweichungen des Kreuzkopfes aus seiner Mittellage

dar, diese sind durch eine reine Sinuskurve gegeben. T_1 und T_2 sind die Maschinentotpunkte. Ist die Indikatorschnur nicht dehnbar, so stellt die gleiche Kurve *1*, nur in einem anderen Maßstabe, auch die Ausschläge der Indikatortrommel, von ihrer Mittellage, dar: beider Bewegung muß ja gleichartig sein. Nun ist aber die Schnur dehnbar. Sie dehnt sich zunächst wegen statischer Verhältnisse auch bei langsamster Gangart der Maschine, weil die Trommelfeder am einen Hubende, bei T_1, stärker gespannt ist als am anderen. Die stärkere Spannung bewirkt stärkere Dehnung. Unter den Annahmen, die wir oben machten, wird die Dehnung proportional den Trommelausschlägen sein, die Sinuslinie *2* stellt sie also

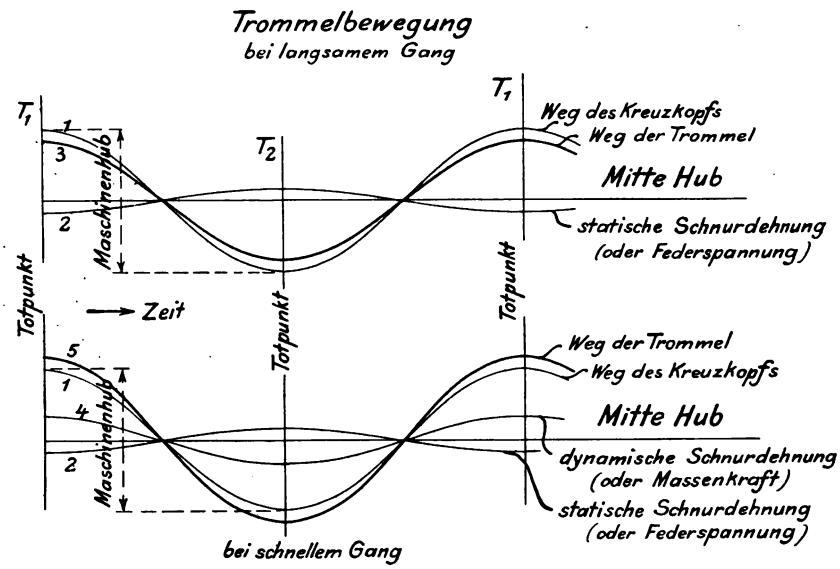


Fig. 161 und 162.

dar. Die Trommel macht in Wahrheit eine Bewegung — immer abgesehen von der Reduktion des Hubes —, welche durch Kurve *3* dargestellt wird, wo die Ordinaten von *1* um diejenigen von *2* vermindert sind. Daß man vermindern, nicht etwa vermehren muß, wird man übersehen können: es muß Hub verloren gehen.

Bei schnellerer Gangart treten noch dynamische Wirkungen der Trommelmasse hinzu. Nach dem bisherigen halten sich Federspannung und Schnurspannung jederzeit das Gleichgewicht, für die Beschleunigung und Verzögerung der Trommel bleibt bisher nichts übrig. Um eine Beschleunigung eintreten zu lassen, muß noch eine weitere Abweichung der Trommelbewegung von der durch Kurve *1* dargestellten stattfinden. Nun weiß man aus der Mechanik, daß bei einer Bewegung, wo die Wege durch eine Sinus-

linie dargestellt werden, auch Geschwindigkeit und Beschleunigung Sinuslinien sind, so zwar, daß die Beschleunigungskurve keine Fasenverschiebung gegen die Wegkurve hat (harmonische Schwingungen). Die Beschleunigung der Trommel, also auch die zusätzlichen Spannungen der Schnur, also auch die zusätzlichen Schnurdehnungen oder zusätzlichen Trommelwege werden also durch die Sinoide *4*, Fig. 162, dargestellt. Wir haben nun die Kurven *1*, *2* und *4* zu addieren und erhalten als wahre Trommelbewegung die Kurve *5*, offenbar auch eine Sinuslinie.

Eine Sinusbewegung ergibt sich also unter allen Umständen, und zwar eine solche ohne Fasenverschiebung gegen die Kreuzkopfbewegung, nur fällt die Diagrammlänge bei langsamem Gang zu klein aus und vergrößert sich mit wachsender Tourenzahl.

Wir begnügen uns mit diesem anschaulichen, wenn auch nicht strengen Beweis für unsere Behauptung, daß Proportionalität zwischen Kreuzkopf- und Trommelbewegung gewahrt sei. Da wir ungenaue Annahmen über Schubstangenlänge und Schnurdehnung machten, so können wir ja doch nichts weiter folgern, als daß die Unrichtigkeiten der Trommelbewegung, sekundären Ursachen entspringend, sich in mäßigen Grenzen halten werden.

Immerhin ist es eine wichtige Regel, auf möglichst geringe Schnurdehnung zu sehen. Die besonders hergestellte Indikatorschnur ist bedeutend weniger dehnbar als gewöhnlicher Bindfaden. Außerdem achte man darauf, daß die Schnur vom Hubminderer zur Trommel möglichst kurz ausfällt, denn ihre Dehnung kommt unverkürzt ins Diagramm. Besonders ist die übliche Methode, je zwei Indikatoren von einem Hubminderer aus anzutreiben, wobei die zweite Trommel von der ersten aus angetrieben wird, sehr anfechtbar: die Bewegung der zweiten Trommel wird falsch.

166. **Fälschungen des Diagramms.** Der Indikator ist kein Präzisionsinstrument, bei seiner Anwendung treten eine große Menge von Unsicherheiten auf, welche das Ergebnis ungenau machen.

Die Bewegung des Schreibstiftes ist nicht korrekt. Die Massenschwingungen sind noch das mindest Schlimme. Die frühere Fig. 159 zeigt, wie verschieden Diagramme ausfallen, wenn man den Schreibstift verschieden stark andrückt; seine Reibung auf dem Papier ist die Ursache davon, und ähnliches wird die Kolbenreibung bewirken können. Daher die Regel, daß der Kolben lieber etwas leicht gehen und ausblasen, als sich klemmen sollte. — Ist die Bohrung des Indikatorstutzens zu eng, so treten die Druckschwankungen im Maschinenzylinder nicht in voller Größe in den Indikatorzylinder über, den gleichen Einfluß hat eine zu lange Zuleitung, wie man sie findet, wenn beide Zylinderenden mit einem Indikator indiziert werden. Scharfe Knicke in der Zuleitung, etwa im Indikatorhahn, sind zu vermeiden. Man erhält sonst Rohrdiagramme, nicht Zylinderdiagramme. Diese Fehler nehmen zu mit wachsender Tourenzahl.

Auch die Bewegung der Papiertrommel ist nicht korrekt. Die Massenschwingungen und die Schnurdehnung sind eingehend besprochen. Längere Schnurführungen machen wohl Querschwingungen, die schädlich sind.

Zu diesen Fehlern kommt bei Dampfmaschinen noch die Veränderung des Federmaßstabes mit der Temperatur und die Unmöglichkeit, eine Federeichung bei der Gebrauchstemperatur auszuführen, weil diese selbst je nach Handhabung des Indikators wechselt. Es kommt ferner dazu, daß das Indikatorpapier oft beim Indizieren feucht wird und sich beim Trocknen verzieht; man sollte deshalb jedes Diagramm sofort planimetrieren. Es kommt dazu, daß der Raum über dem Kolben zwar stets durch Löcher mit der Atmosphäre in Verbindung ist, daß diese Löcher aber oft zu eng sind, so daß sich über dem Kolben ein Gegendruck bildet.

Alles dieses — und die Liste der Unsicherheiten ließe sich ausdehnen — führt zu dem an den Anfang gestellten Satz, daß der Indikator kein Präzisionsinstrument ist. Mancher Streit erledigt sich von selbst dadurch, daß die strittigen Fragen weit außerhalb der Genauigkeitsgrenzen des verwendeten Instruments liegen. Das wird selbst von maßgebendsten Stellen nicht immer genügend beachtet. Ein Diagramm zeichnet der Indikator immer, ob es aber richtig ist, ist eine andere Frage, selbst bei geschickter Handhabung.

167. **Indizieren bei hohen Tourenzahlen.** Bei höheren Tourenzahlen nehmen einige von den aufgezählten Fehlern solche Beträge an, daß die Indizierung äußerst schwierig wird. Die Indikatoren werden in einer schwereren Ausführung, „Großes Modell", und in einer leichteren, „Kleines Modell", ausgeführt. Bei den letzteren ist die Masse der bewegten Teile möglichst verringert, um einerseits die Massenschwingungen, andererseits die Trommelschleuderung kleiner zu machen, sie sind daher bis zu höheren Tourenzahlen verwendbar als das große Modell, das aber bei langsamem Gange, bis zu 200 Touren, größere und deshalb genauere Diagramme liefert. Besonders leicht ist der Crosby-Indikator ausgeführt, der deshalb bis 800, ja 1000 Touren verwendbar sein soll, immerhin auf Kosten der Exaktheit des Diagrammes.

Werden, bei 250 Touren etwa, beim kleinen Modell die Massen- und Schleuderwirkungen zu heftig, so muß man sich mit kleineren Diagrammen begnügen und einerseits eine starke Feder ins Schreibzeug einziehen, andererseits den Trommelhub verkleinern. Auch ein starkes Anspannen der Trommelfeder ist nötig. Diagramme von mehr als etwa 400 Touren sind für die Arbeitsermittlung stets mit unbedingtem Mißtrauen zu betrachten.

Die angegebenen Tourenzahlen sind bei Pumpen bei weitem nicht zu erreichen wegen der Massenwirkung des Wassers.

168. **Indizieren bei hoher Spannung.** Bei sehr hohen Drucken ist es nicht mehr möglich die Federn kräftig genug herzustellen, so daß sie der zunehmenden Kolbenkraft widerstehen können. Die meisten Indikatoren

sind so hergestellt, daß die Bohrung des Anschlußstutzens den halben Durchmesser hat wie der eigentliche Indikatorzylinder (Fig. 143), in Fig. 149 ist der Indikatorzylinder auswechselbar gegen einen, dessen Bohrung den halben Querschnitt hat. Besondere Kolben werden auf Bestellung geliefert, die in dieser Bohrung laufen, übrigens aber mit denselben Federn verwendbar sind wie die normalen Kolben. Nur hat man zu beachten, daß nun die Spannung auf kleinerer Fläche angreift und den Schreibstift nicht so hoch heben kann, der Federmaßstab wird etwa doppelt so groß sein wie der Feder aufgestempelt ist. Eine Feder mit dem Aufdruck 8 mm und für 8 kg/qcm höchster Spannung ist nun für 16 kg/qcm brauchbar und es gilt 4 mm = 1 at.

Für noch höhere Drucke, etwa für hydraulische Anlagen, hat man auch wohl besondere Einsätze, die noch kleinere Kolben verwenden lassen; auch hat man für diese Zwecke besonders stark gebaute Indikatoren.

Es gibt Federn, die bei einem Maßstab von 1,5 mm = 1 at bis zu etwa 40 at mit gewöhnlichem Kolben brauchbar sind. Darüber hinaus, aber auch schon bei kleineren Spannungen verwendet man die Spezialkolben.

169. **Indikatoren mit großen Kolben.** Zur Verminderung der Massenschwingungen hat man die bewegte Masse möglichst zu vermindern gesucht. Das Bestreben ist zweifellos richtig, geht man aber zu weit, so kommen durch Deformation der allzu schwachen Teile mehr Fehler ins Diagramm als durch Verminderung der Masse beseitigt werden. Der Crosby-Indikator, Fig. 144, geht fast schon über die Grenze hinaus.

Man sollte nun bedenken, daß die Größe der Massenschwingungen nicht nur von der Masse abhängt, sondern auch von der Federkraft: bei starken Federn werden, ceteris paribus, die Massenwirkungen kleiner sein. Wenn man nun den Indikatorkolben vergrößert, so wird dadurch die für eine gegebene Spannung anzuwendende Feder stärker, und zwar stärker proportional der Kolbenfläche. Dagegen wird mit der Kolbenfläche die bewegte Masse nur wenig zunehmen, jedenfalls nicht proportional der Vergrößerung. Die dynamischen Verhältnisse werden also günstiger. Da außerdem Reibung des Kolbens im Zylinder, des Schreibstifts auf dem Papier die gleichen bleiben, während die Federkraft erheblich vergrößert ist, so wird ein Indikator mit größerem Kolbendurchmesser bessere Resultate liefern können, wo Massenwirkung und namentlich Reibung Schwierigkeiten machen: bei kleinen Spannungen, etwa an Gebläsen oder am Niederdruckzylinder der Dampfmaschine. Die ganz unzuverlässigen normalen 2 kg-Federn ließen sich vermeiden. Für große Spannungen freilich würden die Federn allzu stark ausfallen. Aber, wie schon mehrfach erwähnt, es braucht nicht ein Indikator alles zu machen.

Man sollte also für viele Zwecke — Gebläse, Niederdruckzylinder — stets Indikatoren mit etwa 4 cm Kolbendurchmesser haben.

170. **Andere Spezialindikatoren: für Kältemaschinen, für fortlaufende Diagramme.** Außer den soeben besprochenen Spezialindikatoren für hohe Tourenzahl, hohen Druck und hohe Temperatur wären an Spezialinstrumenten noch die ganz unter Ausschluß von Bronze aus Eisen und Stahl hergestellten Indikatoren für Verwendung an Kühlmaschinen zu erwähnen. Ammoniak nämlich und auch Schwefeldioxyd, die in diesen Maschinen arbeiten, greifen Kupferlegierungen an.

Man hat auch Indikatoren für fortlaufende Diagramme. Um die Anlaufverhältnisse von Maschinen zu untersuchen — in Frage kommen namentlich Fördermaschinen, eventuell Lokomotiven — wünscht man Diagramme dauernd während der ganzen Anlaufperiode aufzunehmen, da jedes folgende Diagramm anders ausfällt als das vorhergehende. Nimmt man mittels einfachen Indikators ein Dauerdiagramm, so überdecken sich die Diagramme, so daß man sie nicht mehr auseinanderfinden kann. Bei den in Rede stehenden Indikatoren wird nun das Dauerdiagramm auf einen langen Papierstreifen aufgenommen, welcher in der entsprechend veränderten Papiertrommel untergebracht ist. Die Papiertrommel erfährt eine hin und her gehende Bewegung wie immer. Außerdem aber wird am einen Hubende immer der Papierstreifen einige Millimeter fortgeschoben, so daß die einzelnen Diagramme genügend auseinanderfallen. Wegen der Einzelheiten dieser Konstruktion verweisen wir auf die Prospekte.

171. **Versuche, den Indikator zu ersetzen.** Man hat verschiedentlich versucht, den Indikator mit seiner lästigen Planimetrierung zu ersetzen. Man hat beispielsweise ein Differentialmanometer statt seiner verwendet, welches mit Hilfe eines Umschalthahnes an die Zylinderenden angeschlossen war. Der Umschalthahn wurde vom Kreuzkopf in beiden Hubenden so betätigt, daß die eine Seite des Differentialmanometers immer mit der auspuffenden, die andere immer mit der arbeitenden Zylinderhälfte in Verbindung stand. Das Manometer zeigte dann, bei genügender Abdrosselung, einfach den mittleren Spannungsunterschied zwischen beiden Kolbenseiten an und konnte daher, so folgerte man, wie ein Indikator zur Leistungsermittlung benutzt werden. Die Folgerung ist falsch: das Manometer zeigt nicht das an, was wir mit p_m bezeichneten. Das Manometer gibt den zeitlichen Mittelwert der Spannungen; der Indikator bezieht den Mittelwert p_m auf den vom Kolben zurückgelegten Weg s, nicht auf die Zeit t. Das Manometer bildet das Integral $\int P \cdot dt$, der Indikator dasjenige $\int P \cdot ds$, und nur das letztere ist geleistete Arbeit.

Kein einfacheres Instrument ersetzt bisher den Indikator auch nur für die einfache Leistungsermittlung, wo man auf die Form des Diagramms gar keinen Wert legt. Versuche, das Indikatorschreibzeug gleich mit dem Planimeter mechanisch zu verbinden, haben immer auf zwar theoretisch richtige, aber wegen ihrer Schwerfälligkeit praktisch unbrauchbare Konstruktionen geführt.

XI. Messung der Temperatur.

172. **Einheit.** Der Begriff der Temperatur ist unmittelbar durch die Anschauung gegeben: das Gefühl lehrt uns warm und kalt zu unterscheiden. Im übrigen ist die Temperatur jene Größe der Wärmeenergie, auf deren Differenzierung — Vorhandensein von Temperaturunterschieden — die Möglichkeit beruht, die Wärme technisch nutzbar zu machen, und auch, sie von einem Körper auf einen anderen zu übertragen.

Man mißt die Temperatur nach Graden Celsius. Diese Einheit ist eine empirisch willkürliche: man nennt 100° C den Temperaturunterschied vom Gefrierpunkt des Wassers bis zu seinem Siedepunkt bei 760 mm Barometerstand.

173. **Quecksilber- und Wasserstoffskala.** Hiermit ist noch nicht der Grad Celsius selbst definiert, sondern nur sein Hundertfaches. Es fragt sich, wie man die Unterteilung in 100 Teile bewirken will.

Wir dürfen das gewöhnliche und auch das Luftthermometer als bekannt voraussetzen. Bei letzterem dient die Ausdehnung der Luft als Maß für die Temperaturerhöhung. Markieren wir an einem Quecksilber- und einem Luftthermometer den Gefrier- und den Siedepunkt und teilen jedesmal den Abstand in 100 Teile, so gehen beide Instrumente bei den genannten Fixpunkten überein; aber bei Zwischentemperaturen machen sie voneinander abweichende Angaben. Alle Substanzen nämlich dehnen sich nicht genau proportional der Temperaturänderung aus; das Gesetz, nach dem die Ausdehnung sich vollzieht, ist bei verschiedenen Substanzen ein verschiedenes. So zeigt denn das Quecksilberthermometer auf 50,11°, wenn das Luftthermometer 50° angibt (Fig. 163).

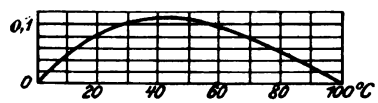


Fig. 168.
Unterschied zwischen *Hg*- und *H*-Thermometer, *Hg*-Thermometer zeigt mehr.

Ursprünglich wurde das Quecksilberthermometer der Celsiusskala zugrunde gelegt. Als man auf die besprochenen Unterschiede stieß, bedachte man, daß kein Grund vorliege, gerade die Ausdehnung des Quecksilbers als normal anzusehen. Eine bessere Grundlage schien die Ausdehnung der Gase zu bilden; dehnen sich doch alle Gase etwa gleich viel, um $^1/_{273}$ ihres Volumens bei 0°, aus. Und wo die allerfeinsten Unterschiede zu beachten waren, da schien der Wasserstoff, der sich nach den Lehren der Wärmetheorie am meisten einem idealen vollkommenen Gase nähert, diejenige Gasart zu sein, deren Ausdehnung nicht zufällig ist, sondern ein Gesetz verkörpert.

Von der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt werden Thermometer häufig (nicht immer) nach dem Wasserstoffthermometer geeicht. Tabellenwerke legen meist das Quecksilberthermometer zugrunde. Die Unterschiede brauchen technisch wohl kaum je beachtet zu werden, doch wollten wir auf sie hingewiesen haben.

Durch Einführung des Wasserstoffthermometers als Normalie ist auch eine Schwierigkeit beseitigt: die Celsiusskala ist zunächst nur für die Temperaturen von 0° bis 100° gemacht. Man setzt aber die Teilung nach beiden Seiten gleichmäßig fort. Beim Quecksilber ist das nur möglich abwärts bis nahe zum Gefrierpunkt des Quecksilbers, aufwärts bis zu seinem Siedepunkt oder bei den sogleich zu besprechenden Instrumenten mit Stickstoffüllung bis 550° C. Über diese Grenzen hinaus hätte dann die Celsiusskala gar keinen Sinn mehr. Für das Wasserstoffthermometer gibt es nach oben hin keine theoretische Grenze, nach unten hin liegt sie beim Siedepunkt des Wasserstoffs, also so tief, daß sie praktisch nicht in Betracht kommt.

Meist, aber nicht immer, darf man den Unterschied beider Thermometerskalen unbeachtet lassen. Der krasseste Fall, der vorkommen kann, ist wohl folgender: An einem Kondensator fließe Wasser mit 8° zu und mit 20° ab; Temperaturzunahme 12°; diese sei mit einem nach der Wasserstoffskala geteilten Instrument ermittelt. Mit einem einfachen Quecksilberthermometer hätte man (Fig. 163) 8,04° und 20,08° abgelesen, also eine Temperaturzunahme um 12,04° gefunden. Der Unterschied von 0,04° ist $^1/_3$ % der Temperaturzunahme. Man begeht einen Fehler von $^1/_3$ %, wenn man nach der Wasserstoffskala abliest, aber für die weitere Auswertung Tabellen für die spezifische Wärme oder dergleichen benutzt, denen die Quecksilberskala zugrunde liegt.

Praktisch kommt natürlich nie die Verwendung des Wasserstoffthermometers selbst in Frage, aber die benutzten Quecksilberinstrumente können nach der Wasserstoffskala geteilt oder geeicht sein.

174. **Quecksilberthermometer.** Das Quecksilberthermometer, bestehend aus der Kugel und dem Faden, neben letzterem die Skala, ist bekannt. Gute Thermometer bestehen meist aus Jenenser Glas. Das den Faden enthaltende flache Glasrohr pflegt oben noch eine Erweiterung zu haben, in welche das Quecksilber beim Überschreiten der Höchsttemperatur eintritt, sonst müßte das Instrument zerspringen. Nicht selten bleibt in dieser Erweiterung etwas Quecksilber zurück. Da das natürlich die Ablesung fälscht, so achte man darauf, daß kein Quecksilber in der Erweiterung steht. Ist das Quecksilber unrein, so hängt es leicht auch in der Röhre selbst, der Faden teilt sich; auch das ist natürlich unzulässig. Man schwenke das Thermometer, so daß die Schwungkraft das abgerissene Quecksilber zum übrigen treibt, oder schlage die Hand mit dem Thermometer darin auf den Tisch. Besser ist vorsichtiges Erwärmen der oberen Erweiterung des

Thermometers, so daß das Quecksilber in die Röhre getrieben wird. Wenn später das Abreißen wieder und wieder an gleicher Stelle erfolgt, so kühle man das Thermometer mit Eis oder Ätherwatte so weit ab, daß der Faden ganz in die Kugel hineintritt; dann vereinigt sich alles Quecksilber.

Thermometer werden mit verschiedenem Skalenbereich geliefert; oft gehen sie von -10^0 bis $+110^0$ oder noch weiter hinauf, andererseits gibt es aneinanderschließende Sätze: 0^0 bis 40^0, 35^0 bis 75^0, 70^0 bis 110^0. Je enger der Meßbereich, desto weiter wird die Skala und desto genauer, freilich nur in geübter Hand, die Ablesung, aber desto weniger verwendbar ist das Instrument. Will man übrigens ein Thermometer für höhere Temperaturen verwenden als ihm zukommen, so kann man durch Schwenken etwas Quecksilber in die eben besprochene Erweiterung bringen und das Instrument so benützen, muß aber durch Vergleich mit einem anderen Thermometer feststellen, wieviel Grade man jeder Ablesung zuzuzählen hat.

175. **Messung hoher und tiefer Temperaturen.** Das gewöhnliche Quecksilberthermometer bleibt bis 330^0 anwendbar, passende Skala vorausgesetzt. Bei 360^0 siedet das Quecksilber. Das zu hindern füllt man den Raum über dem Quecksilber, der gewöhnlich luftleer ist, mit Stickstoff oder Kohlensäure von etwa 10 at Spannung. Das Instrument ist nun bis 500^0, spezielle Instrumente sogar bis 575^0, verwendbar, das heißt bis das Glas erweicht, das übrigens genügend starkwandig sein muß. Der oft zu hörende Name „Stickstoffthermometer" ist selbst dann nicht sehr charakteristisch, wenn der obere Raum wirklich mit Stickstoff gefüllt ist: das Wirksame ist immer noch das Quecksilber.

Weingeistthermometer sind insofern schlechter als Quecksilberinstrumente, als der Weingeist das Glasrohr innen benetzt, daher etwas daran hängen bleibt. Für niedrige Temperaturen, unter -10^0, sind sie aber vorzuziehen, weil das Quecksilber zähe zu werden beginnt; mit leicht siedendem Petroläther hat man bis -180^0 messen können.

In Wechselstromfeldern geben Quecksilberinstrumente der Wirbelströme wegen falsche Werte.

176. **Fadenkorrektion.** Thermometer sind so geeicht, daß sie richtig zeigen, wenn auch der ganze Faden die zu messende Temperatur hat. Taucht nur die Kugel in den Raum ein, und hat der Faden eine andere Temperatur, so hat man eine Korrektion anzubringen, die man Fadenkorrektion nennt.

Es könnte einfacher scheinen, gleich beim Eichen den Faden herausschauen zu lassen, um die Korrektion zu umgehen. Da aber die Temperatur der umgebenden Luft, die ja die Fadentemperatur zu sein pflegt, wechselt, so ist diese Vereinfachung nicht angängig. Nur Thermometer für hohe Temperaturen, über 200^0 etwa, sind bisweilen „mit herausragendem Faden" geeicht und dann so bezeichnet. Gegenüber den hohen Temperaturen spielen die kleinen Schwankungen der Lufttemperatur keine Rolle.

Nun muß aber der ganze Faden herausschauen, und das ist auch oft unbequem.

Bezeichnen wir mit λ den Ausdehnungskoeffizienten des Quecksilbers so dehnt sich also ein Faden von 1 cm Länge um λ cm, wenn wir ihn um 1^0 erwärmen. Statt des Centimeters können wir auch die Länge eines Grades der Thermometerskala zugrunde legen und sagen, der Faden von 1^0 Länge dehne sich um λ^0. Nur müssen wir jetzt, weil ja die Gradteilung selbst sich ausdehnt, unter λ den scheinbaren Ausdehnungskoeffizienten des Quecksilbers in Glas verstehen; für das übliche Jenenser Glas ist $\lambda = \frac{1}{3600}$. Machen wir nun die Ablesung t_0 am Thermometer, während der um n Grade herausragende Faden die Temperatur t_f hat, so ist offenbar die wahre Temperatur der Thermometerkugel $t = t_0 + \frac{n\,(t - t_f)}{3600}$, oder auch, weil t und t_0 nicht viel voneinander verschieden sind

$$t = t_0 + \frac{n\,(t_0 - t_f)}{3600}.$$

Der zweite Summand dieser Formel ist die Fadenkorrektion. Man mißt die Fadentemperatur durch ein Hilfsthermometer, dessen Kugel in halber Höhe des Fadens hängt — oder schätzt sie.

Um welche Beträge es sich bei der Fadenkorrektion handelt, geht aus folgenden beiden Beispielen hervor: Sei die Temperatur von Essengasen zu messen; wir haben 324^0 abgelesen, dabei schaute der Faden von 150^0 an heraus und seine Temperatur sei mit 32^0 gemessen oder geschätzt. Die Fadenkorrektion beträgt also $\frac{(324 - 150)\,(324 - 32)}{3600} = 14{,}1 \sim 14^0$; die wahre Temperatur ist 338^0 statt 324^0. Wollten wir die Wärmeverluste feststellen, welche daher rühren, daß die Essengase mit mehr als 20^0 C abgehen, so hätten wir durch Unterlassung der Korrektion einen Fehler von $\frac{14}{338 - 20} \cdot 100 = 4{,}4\,\%$ erhalten. — Selbst bei geringen Temperaturen sind die Fehler nicht belanglos. An einem Oberflächenkondensator oder Vorwärmer lasen wir die Zulauftemperatur des Wassers $10{,}6^0$, die Ablauftemperatur $39{,}7^0$ ab, würden also eine Temperaturzunahme von $29{,}1^0$ feststellen. Im Raum herrscht aber die Temperatur 27^0, und das sei auch die Temperatur der Fäden, die beide von -10^0 an herausragen. Die Fadenkorrektionen sind: für den Zulauf $-0{,}094^0$ (negativ!), und für den Ablauf $+0{,}176^0$. Beachten wir sie, so wird die Temperaturzunahme des Wassers um $0{,}094 + 0{,}176$ oder um fast $0{,}27^0$ größer; der Fehler durch ihre Nichtbeachtung ist $\frac{0{,}27}{29{,}1} \cdot 100 \sim 1\,\%$! Wenn man solche Korrektionen vorzunehmen als zu umständlich erachtet, darf man wenigstens nicht

das Resultat auf sehr viele Stellen angeben. — Das einfachste ist, darauf zu achten, daß beide Quecksilberfäden um gleich viele Grade herausragen und gleiche Temperatur haben, dann wird die Differenz der Temperaturen richtig.

177. **Anbringung der Thermometer.** Wo man die Temperatur von Flüssigkeiten, Gasen oder Dämpfen zu messen hat, namentlich wenn diese in Rohrleitungen zirkulieren, kann man oft das Thermometer nicht einführen; wenn das betreffende Medium unter Druck steht würde das Thermometer herausgeschleudert. Es bleibt dann ein Notbehelf gegenüber der direkten Einführung, die stets besser ist, wenn man einen Stutzen nach Fig. 164 in das Rohr einsetzt (in senkrechte Rohre schräg), in den Stutzen Öl füllt und nun das Thermometer ins Öl taucht. Man nimmt auch Quecksilber statt Öl, das ist sogar vorzuziehen, doch darf der Stutzen dann nicht aus Messing sein; bei höheren Temperaturen bedeckt man das Quecksilber mit einer Schicht Öl, um Verdunsten zu verhüten. Es geht aber bei dieser ganzen Methode Wärme aus dem Stutzen an die Rohrwand über, so daß bei höheren Temperaturen nicht die volle Temperatur an das Thermometer kommt. Man sollte das ganze Rohr in der Nähe des Stutzens gut isolieren. Noch weniger gut ist bloßes Anlegen des Thermometers, unter Umwickeln mit Kupferdraht zwecks besserer Leitung, und Isolieren des ganzen. Man kann wohl so ermitteln, wann das betreffende Rohr wärmer oder kälter wird, nicht aber die Temperatur des Mediums selbst finden.

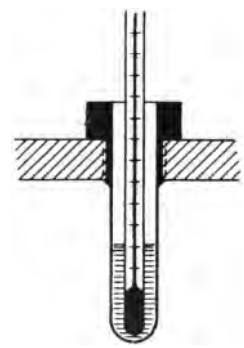


Fig. 164.

Das beste bleibt wie gesagt direktes Einführen der Kugel. Wenn man das Thermometer, etwas mit Öl bestrichen, durch einen Gummistopfen steckt, so haftet es nach einigen Tagen so fest darin, daß man es nur noch unter Preisgabe des Stopfens losbekäme. Stopfen mit Thermometer kann man nun in ein Loch der Rohrleitung stecken und durch Festbinden vor Herausschleudern sichern. Das geht selbst bei ziemlich hohen Spannungen.

Auf jeden Fall wird durch Anwendung eines Ölstutzens die Trägheit des Thermometers erhöht, es folgt Temperaturschwankungen langsamer; das ist selten erwünscht, oft freilich gleichgültig.

Um die Temperatur fester Körper zu messen — etwa die Erwärmung eines Lagers, eines Elektromotors nach längerem Laufen — ist es das beste, Quecksilber in ein besonders gebohrtes Loch zu füllen und das Thermometer hineinzusenken. Sonst umwickelt man auch wohl die Thermometerkugel mit Stanniol, legt sie an die zu untersuchende Stelle und bedeckt sie gut mit Watte.

178. **Thermoelektrische Pyrometer.** Wir erwähnten, daß Quecksilberthermometer jetzt bis 575° C brauchbar zu beschaffen sind. Man sollte sie als

die einfachsten und zuverlässigsten Instrumente soweit möglich immer für Untersuchungszwecke benutzen. Für noch höhere Temperaturen aber verwendet man andersartige Apparate, die unter dem Namen Pyrometer bekannt sind.

Für Untersuchungszwecke technischer Art ist das Pyrometer von Le Chatelier das weitaus gebräuchlichste. Sein wirksamer Teil ist ein Thermoelement, gebildet aus zwei dünnen Drähten, die miteinander in einer Kugel verschmolzen sind, der eine aus Platin, der andere aus einer Platinrhodiumlegierung mit 10 % Rhodium. Fig. 165 zeigt, daß die von solchem Element entwickelte elektromotorische Kraft einigermaßen proportional der an der Lötstelle vorhandenen Temperatur ist. Ein zugehöriges Galvanometer läßt direkt Grade ablesen. Dabei ist vorausgesetzt, daß die Enden der wirksamen Platindrähte, d. h. die Stellen wo sie in Kupfer übergehen, auf 0° C gehalten werden. Statt dessen genügt es, die Fig. 165 einfach auf die Temperaturdifferenz der beiden Lötstellen zu beziehen: dazu ist die Skala des Galvanometers verstellbar, und man stellt sie vor Beginn des Versuches so ein, daß sie Zimmertemperatur zeigt, wenn das Thermoelement einfach im Zimmer liegt.

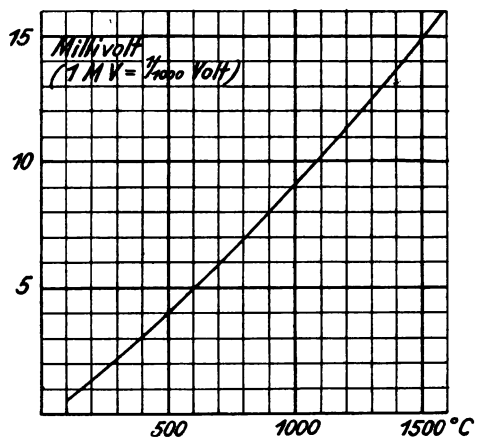


Fig. 165. Elektromotorische Kraft des Lechatelier-Pyrometer.

Le Chatelier-Instrumente werden von der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt geprüft und beglaubigt. Nach Versuchen, welche genanntes Institut vor etwa 10 Jahren, beim Auftauchen derselben, mit diesen Pyrometern vornahm, ist die Angabe verschiedener Instrumente gut miteinander vergleichbar; bei einer Temperatur von 1000° C beträgt die Unsicherheit etwa $\pm$ 5°. Eines beachte man indessen: Die Angaben der Reichsanstalt, die jedem Instrument beizuliegen pflegen, geben die elektromotorische Kraft des Elementes. Ein angeschlossenes Millivoltmeter indessen mißt die Klemmenspannung, welche um den Spannungsabfall im Element geringer ist als erstere. Der Spannungsabfall hat die Größe $J \cdot W$, worin J die Stromstärke und W der innere Widerstand des Elementes ist; da nun J vom äußeren Widerstand, das heißt dem des Galvanometers abhängt, so wird auch die Klemmenspannung des Elementes eine verschiedene sein, je nach dem angewendeten Galvanometer. Deshalb kann die Reichsanstalt ihre

Angabe nur in der erwähnten Form machen, und man hat je nach dem angewendeten Galvanometer eine Umrechnung vorzunehmen, die eine einfache Anwendung des Ohmschen Gesetzes ist. Kennt man die Widerstände von Element und Galvanometer, so ermittelt man am besten ein für allemal die für diese Kombination charakteristische Beziehung zwischen Galvanometerangabe und Temperatur. Meist hat das Galvanometer schon die entsprechende Temperaturskala, oder die liefernde Firma gibt sie an. Wechselt man aber das Galvanometer aus oder hat man sehr lange Leitungen zwischen Element und Galvanometer, so kann man durch Nichtbeachtung des Gesagten Fehler von mehreren Prozenten begehen.

Leider ist es nicht angängig, das Thermoelement direkt der zu messenden Temperatur auszusetzen. Es muß mit einer Porzellanhülle versehen werden, weil Kohlenoxyd, welches ja meist in den zu untersuchenden Gasen ist oder doch zeitweise darin sein kann, die Platinrhodiumlegierung und damit die elektromotorische Kraft verändert. Die Notwendigkeit der Umhüllung ist deshalb oft bedauernswert, weil ohne sie die Trägheit viel geringer wäre. Das Pyrometer ist also ein stabförmiger Körper mit zwei Polklemmen, in ihm laufen die beiden Drähte entlang; einer der Drähte ist behufs Isolation mit einem engen Porzellanrohr umhüllt; beide sind dann in ein weiteres Porzellanrohr gesteckt, welches vorne geschlossen ist und 1600° aushält. Will man nun das Ganze gegen Stöße sichern, so versieht man es mit einem äußeren Eisenmantel, dann ist es natürlich nur bis etwa 1000° brauchbar (Fig. 166).

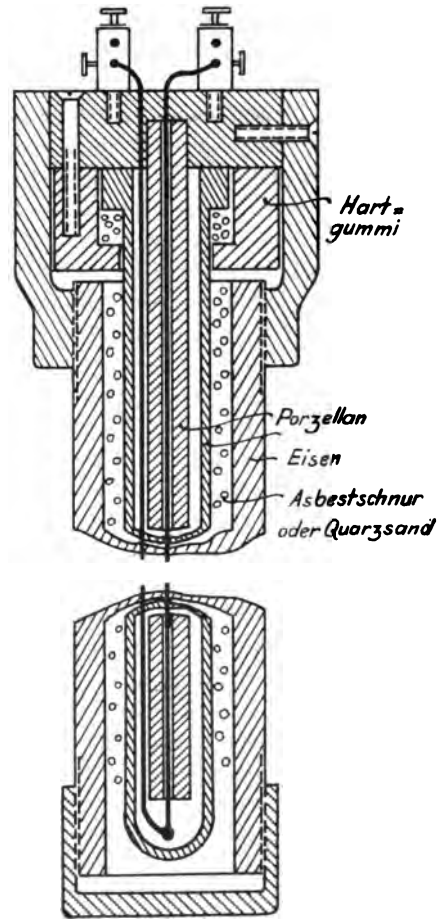


Fig. 166.
Lechatelier-Pyrometer.

Im Gebrauch schmilzt gelegentlich die Schweißstelle der beiden Drähte fort; man kann die Enden einfach wieder umeinander wickeln. Nur wird dadurch das Pyrometer allmählich kürzer.

Ein Vorteil des Le Chatelier-Pyrometers schon bei Messung geringerer Temperaturen ist es, daß man die Ablesung irgendwo ausführen kann, und daß man, mittels eines Umschalters, die Ablesung einer Reihe von Temperaturen alle an einem Orte machen kann. Doch werden für geringere Temperaturen auch andere Thermoelemente, so Eisen-Konstantan-Elemente, benutzt; diese sind billiger und bei niedrigen Temperaturen empfindlicher.

179. **Andere Temperaturmessungen.** Neben den bisher erwähnten Instrumenten, die für technische Untersuchungen heute fast allein benutzt werden, bleiben einige andere aufzuzählen, die wohl auch gelegentlich für Untersuchungen benutzt werden, aber doch im allgemeinen mehr zur Kontrolle laufender Fabrikation dienen. Sie eignen sich hierfür besser als die bisherigen, teils wegen ihrer Unzerbrechlichkeit, teils auch weil sie es gestatten, die Ablesung in einiger Entfernung vom Meßort zu machen.

Graphitpyrometer bestehen aus einem Graphitstab, der in eine Eisenhülle eingeschlossen und nur am einen Ende mit ihr verbunden ist. Unter dem Einfluß höherer Temperaturen dehnt sich die Eisenhülle in der Länge aus, während Graphit die Eigenschaft hat, kaum mit der Temperatur die Länge zu ändern. Daher entsteht eine Relativbewegung der beiden freien Enden gegeneinander, die man für eine Zeigerbewegung ausnutzen kann: ein Gehäuse mit Skala sitzt auf dem Eisenrohr, während der Zeiger mit dem Graphitstab in Verbindung steht. — Metallthermometer nutzen die verschiedene Ausdehnung zweier Metalle zur Messung aus. — Es ist natürlich, daß bei solchen Instrumenten die ganze Länge der messenden Stäbe der Temperatur ausgesetzt sein muß. Auch muß die Masse der Stäbe erst durchwärmt werden, daher zeigen sie erst nach längerer Zeit an: sie sind sehr träge. In Fig. 167 ist eines dargestellt.

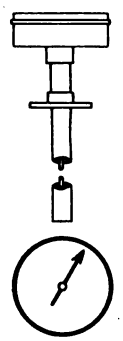


Fig. 167.

Thalpotasimeter nutzen die Tatsache, daß bei siedenden Flüssigkeiten eine eindeutige Beziehung zwischen Spannung und Temperatur besteht, zur Temperaturmessung aus. Wenn ein eisernes Thermometergefäß teilweise mit Äther gefüllt ist, so wird ein Manometer, welches man durch Kapillarrohr damit verbindet, direkt in Grade Celsius geteilt werden können. Dabei wird das Kapillarrohr und das Federrohr des Manometers mit flüssigem Äther sich anfüllen, welcher dorthin als nach dem kälteren Teil destilliert. Es muß dann so viel Äther im Gefäß zurückgeblieben sein, daß bei allen Temperaturen noch Flüssigkeit vorhanden ist und die Dämpfe gesättigt sind. — Das Thalpotasimeter ist theoretisch inkorrekt, weil es vom äußeren Luftdruck abhängig ist und bei wechselndem Barometerstand verschiedene Angaben macht. Die zu messende Temperatur legt ja die absolute Spannung im Thermometergefäß fest, das Manometer aber zeigt nicht absoluten, sondern Überdruck an. Bei genaueren Messungen ist das wohl von Bedeutung. Instrumente mit Ätherfüllung können etwa von 50° (nicht weniger) bis

180° benutzt werden. Von 360° bis zur Rotglut (650°) hat man entsprechende Instrumente mit Quecksilberfüllung, in denen der Quecksilberdampf die gleiche Rolle spielt wie sonst der Ätherdampf.

In den Quecksilberdruckthermometern ist Quecksilber so in einen genügend widerstandsfähigen Behälter eingeschlossen, daß es denselben ganz ausfüllt unter Vermeidung jedes Luftraumes. Da also bei einer Erwärmung das Quecksilber an freier Ausdehnung gehindert wird, so entsteht eine Spannung, welche als Maß für die Temperatur an einem Manometer abgelesen wird: das Manometer ist empirisch in Grade Celsius geteilt. Den stählernen Quecksilberbehälter kann man mit dem Manometer durch ein längeres Kapillarrohr verbinden und so die Vorrichtung zum Übertragen des Ergebnisses bis auf etwa 50 m Entfernung benutzen. Doch ist zu beachten, daß dann Verhältnisse auftreten ähnlich denen, die beim gewöhnlichen Quecksilberthermometer die Notwendigkeit einer Fadenkorrektion ergeben. Das Quecksilber in Kapillarrohr und Manometerfeder, dessen Menge man freilich möglichst klein hält, stört, indem seine Temperatur — die Temperatur der Umgebung — die Messung beeinflußt. Eine Korrektion ist aber nicht so leicht zu machen, wie beim gewöhnlichen Thermometer. — Die Federthermometer sind von − 20° bis + 350° Grad brauchbar, so weit etwa wie das Quecksilber flüssig ist.

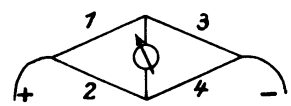


Fig. 168.

Äußerlich stellen sich Thalpotasimeter und Quecksilberdruckthermometer als ein einhüllendes Eisenrohr dar, das in einen Flansch oder dergleichen endet; auf der anderen Seite des Flansches ist ein Manometer (ähnlich wie Fig. 167).

Für Fernangaben recht brauchbar sind Einrichtungen, welche die Änderung des elektrischen Widerstandes von Metallen für die Temperaturmessung ausnutzen. Stellt man drei Zweige *1*, *2*, *3* einer Wheatstoneschen Brücke (Fig. 168) aus Konstanten her, dessen Widerstand von der Temperatur unabhängig ist, den letzten, *4*, aber etwa aus Kupfer, so ist — bei konstanter elektromotorischer Kraft der Stromquelle — der Ausschlag des Galvanometers *G* direkt ein Maß für die Temperatur des ganzen Systems oder des Leiters *4*; die Ablesung kann in beliebiger Entfernung erfolgen.

180. Einige andere, namentlich pyrometrische, Methoden gestatten nicht eine dauernde Kontrolle der Temperaturschwankungen und -änderungen, sondern geben nur einem einmaligen Wert der Temperatur an.

Bei der kalorimetrischen Methode wirft man eine Eisen- oder Platinkugel bekannten Gewichts, die in dem zu untersuchenden Raum dessen Temperatur angenommen hatte, in eine bekannte Menge Wasser und mißt dessen Temperaturerhöhung mittels einfachen Thermometers. Der Wasserwert des Gefäßes ist zu beachten. Abkühlung der Kugel, bevor sie ins Wasser kommt, ist schwer zu vermeiden. Nimmt man stets die gleiche

Wassermenge und die gleiche Kugel, so kann man das Thermometer mit einer beweglichen Skala versehen, deren Nullpunkt man auf den Thermometerstand vor Einwerfen der Kugel einstellt, und an welcher man direkt die Temperatur der Kugel nachher ablesen kann. — Die Methode gibt nur annähernde Werte.

Die in der Tonindustrie üblichen Segerschen Kegel, dreiseitige abgestumpfte Pyramiden aus Tonerdesilikaten, die je nach ihrer Zusammensetzung bei verschiedenen Temperaturen zu schmelzen beginnen, lassen erkennen, ob ihre Schmelztemperatur erreicht ist oder ob nicht. Sie werden in 58 Nummern hergestellt.

181. **Thermometereichung.** Gewöhnliche Thermometer haben, hauptsächlich wegen der ungleichen Weite der Glasröhre, ungleichmäßige Teilung, oder vielmehr die gleichmäßig hergestellte Teilung bedarf einer Korrektion. Man muß die Thermometer eichen durch Vergleich mit einem guten Normalthermometer. — Solche Normalthermometer pflegen mit einem Prüfungsschein der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt versehen zu sein; da aber jedes Thermometer sich ändern kann, so muß man von Zeit zu Zeit die Fixpunkte (0° und 100°) solcher Normalthermometer kontrollieren — oder sie von genanntem Institut von Zeit zu Zeit nachprüfen lassen.

Das Eichen der Gebrauchsthermometer geschieht einfach, indem man ein Wasserbad auf verschiedene, beliebige Temperaturen bringt und die beiden zu vergleichenden Instrumente hineinhält. Das ist für feine Instrumente weniger einfach als es klingt: es sind Strömungen von verschiedener Temperatur in jedem Wasserbade. Man muß gut umrühren, beide Kugeln hart aneinander und namentlich in gleicher Höhe halten, und mehrere Ablesungspaare machen um das Mittel nehmen zu können. Bei Temperaturen über 100° muß man Öl, weiterhin geschmolzenen Salpeter, schließlich geschmolzenes Blei nehmen, bei Temperaturen unter 0° bereitet man Kältemischungen aus Eis und Kochsalz oder Rhodanammonium. Eichungen unter 0° erfordern die meiste Übung. Die Kugeln müssen in Flüssigkeit tauchen, nicht in Luft zwischen den Eisstücken sich befinden.

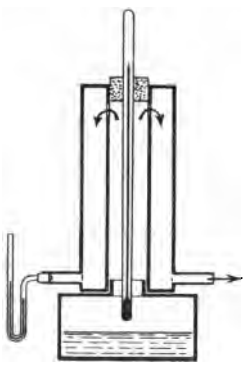


Fig. 169.

Das Nachprüfen der Fixpunkte ist für den Frierpunkt sehr einfach, man bringt das Instrument in das Schmelzwasser von reinem Eis. Schnee ist selten rein. Zum Nachprüfen des Siedepunktes bringt man das Thermometer in den Dampf siedenden Wassers, nicht etwa in das Wasser selbst. Dazu kann man die in der Physik üblichen bekannten Apparate benutzen (Fig. 169), in deren unterem Teil das Wasser siedet; der Dampf steigt auf, geht einen Mantel bildend wieder hinab und entweicht. Man

muß die absolute Spannung des Dampfes messen, um nach den Dampftabellen seine Temperatur zu bestimmen. Dazu verbinde man den Dampfraum mit einem Wassermanometer, und lese außerdem den Barometerstand ab. Diese ganze Prüfung erfordert viel Übung. — Die Fixpunkte pflegen durch Marken auf dem Rohr selbst festgelegt zu sein, für den Fall, daß die Skala sich verschiebt. Auch wo die Skala gar nicht bis zu dem betreffenden Fixpunkt reicht, sind diese Marken oft dennoch vorhanden. Dazu ist das Rohr erweitert und nachher, an der Stelle des Fixpunktes, wieder verengt (Fig. 170).

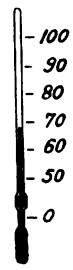


Fig. 170.

Thalpotasimeter und dergleichen Instrumente vergleicht man ebenfalls von Zeit zu Zeit mit geprüften Glasthermometern. Ihr Zeiger pflegt nachstellbar zu sein, so daß man ihn etwa bei siedendem Wasser zum richtigen Anzeigen bringen kann.

XII. Messung der Wärmemenge.

182. **Kalorimetrie.** Wärmemengen mißt man nicht direkt als solche, ermittelt sie vielmehr rechnungsmäßig aus den Einzeldaten: der Temperatur t, dem Gewicht G der erwärmten Stoffmenge und dessen spezifischer Wärme c. Ein Körper enthält gegenüber der als normal angenommenen Temperatur von 0^0 C einen Mehrbetrag an Wärme $Q = G \cdot c \cdot t$; oder aber bei der Erwärmung von t_1 auf t_2 nimmt ein Körper die Wärmemenge $Q = G \cdot c\,(t_2 - t_1)$ auf.

In den meisten Fällen ermittelt man die Wärmemenge erst nachdem man sie auf Wasser übertragen hat. Die Messung von Wärmemengen heißt Kalorimetrie, das Wasser in diesem Fall bezeichnet man als Kalorimeterflüssigkeit.

Dabei sind zwei Arten der Kalorimetrierung denkbar. Wo dauernd Wärmemengen abzuführen und dabei zu messen sind, überträgt man die Wärme auf fließendes Wasser, bestimmt dessen sekundliche Menge und Temperaturzunahme. So hat man beispielsweise die Verluste mit den Auspuffgasen einer Gasmaschine bestimmt, indem man deren Wärme in einem Röhrensystem nach Art der Oberflächenkondensatoren kontinuierlich auf Wasser übertrug. Das sogleich zu besprechende Junkers-Kalorimeter ist ein weiteres Beispiel. Wo dagegen eine einmal entwickelte Wärmemenge festzustellen ist, überträgt man sie auf eine bekannte Quantität ruhenden Wassers und mißt dessen Temperaturerhöhung: dafür wird das Bombenkalorimeter sogleich ein Beispiel bilden.

Beide Methoden der Kalorimetrierung sind einer Reihe von Fehlerquellen ausgesetzt, deren wesentlichste die Strahlung ist. Wir verweisen dieser-

halb auf die Besprechung der beiden genannten Instrumente; manches dort erwähnte läßt sich auf andere Wärmemessungen übertragen.

183. **Wahre und mittlere spezifische Wärme.** Die spezifische Wärme, soeben mit c bezeichnet, ist eine Eigenschaft des betreffenden Materials, die man Tabellenwerken entnimmt. Man kann sie bestimmen, indem man einer bekannten Gewichtsmenge des Materials eine bekannte Wärmemenge zuführt, und die Temperaturerhöhung von t_1 auf t_2 beobachtet. So erhielte man die mittlere spezifische Wärme zwischen den Temperaturen t_1 und t_2; man könnte nicht erkennen, ob von t_1 bis t_2 Proportionalität zwischen zugeführten Wärmemengen und Temperaturerhöhungen statthat. Ginge man schrittweise vor, indem man mehrere kleinere Wärmemengen zuführt und nach der Anfangstemperatur t_1 die weiteren t', t'', endlich wieder t_2 beobachtet, so könnte man schon mehrere mittlere spezifische Wärmen, nämlich zwischen t_1 und t', t' und t'', t'' und t_2 berechnen und etwa konstatieren, daß die spezifische Wärme mit wachsender Temperatur etwas abnimmt. Je kleiner man die Beobachtungsintervalle nimmt, desto klarer tritt solche Veränderlichkeit hervor: als wahre spezifische Wärme bei der Temperatur t bezeichnet man den Quotienten aus einer unendlich kleinen Wärmemenge und der durch sie bewirkten Temperaturzunahme: $c_t = \frac{dQ}{dt}$. Mit genügender Annäherung pflegt man als wahre spezifische Wärme die Wärmemenge einzuführen, welche eine Temperaturerhöhung um 1^0, von t auf $t + 1$, bewirkt.

184. **Verschiedene Wärmeeinheiten. Spezifische Wärme des Wassers.** Die Einheit der Wärmemenge ist die Kalorie, d. i. die Wärmemenge, welche nötig ist, um 1 kg Wasser von 0^0 auf 1^0 zu bringen. Man nennt sie auch kurzweg Wärmeeinheit (WE). Bezieht man die Rechnung nicht auf 1 kg, sondern auf 1 gr, so erhält man das Resultat in kleinen oder Gramm-Kalorien. Es ist offenbar 1 WE = 1000 gr cal.

Neben dieser technisch üblichen sogenannten Nullpunktskalorie ist physikalisch die sogenannte mittlere Kalorie gebräuchlich: Sie wird definiert als hundertster Teil der Wärmemenge, welche die Gewichtseinheit Wasser — wieder entweder 1 kg oder 1 gr — vom Frierpunkt zum Siedepunkt erwärmt.

Wäre die spezifische Wärme des Wassers die gleiche bei allen Temperaturen, so bestände kein Unterschied zwischen der mittleren und der Nullpunktskalorie. Die spezifische Wärme des Wassers ist aber von der Temperatur abhängig, also sind beide Kalorien voneinander verschieden. Da das Gesetz, nach welchem die Änderung der spezifischen Wärme vor sich geht, nur sehr mangelhaft bekannt ist, so steht die Definition der Wärmeeinheit und die ganze Kalorimetrie auf recht unsicheren Füßen. Entsprechend unsicher ist das Verhältnis der mittleren zur Nullpunktskalorie.

Die Fig. 171 zeigt den Verlauf der spezifischen Wärme des Wassers: die rechts ansteigende Kurve gibt die Regnaultschen Werte wieder, wie sie den bekannten Zeunerschen Dampftabellen zu entnehmen sind; die rechts abfallende Kurve ist von Wüllner als nach neueren Versuchen wahrscheinlichste gegeben. Diese beiden Kurven sind auf die mittlere Kalorie bezogen, daher müssen die von jeder derselben über und unter der Einslinie abgeteilten Flächen inhaltsgleich sein. Wir haben nur beide Kurven so zu verschieben, daß sie bei Eins beginnen, um, wenigstens mit Annäherung, die spezifische Wärme bezogen auf die Nullpunktskalorie zu haben (Fig. 172). Die Resultate der älteren und der neueren Versuche weichen so dargestellt noch mehr voneinander ab, ohne daß man doch in der Lage wäre, die einen unbedingt vorzuziehen. Es ist also nicht einmal aufgeklärt, ob die spezifische Wärme des Wassers mit steigender Temperatur steigt oder fällt.

Unter diesen Umständen ist es freilich berechtigt, kurzerhand die spezifische Wärme des Wassers bei allen Messungen der Wärmemenge

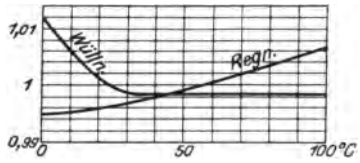


Fig. 171.

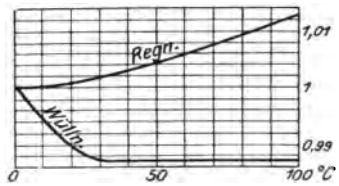


Fig. 172.

als konstant anzusehen und gleich Eins zu setzen. Doch muß man im Gedächtnis behalten, daß alle Ergebnisse mit einer Unsicherheit von mindestens 1% behaftet sind — und dies zu zeigen war der Zweck der vorhergehenden Zeilen.

Nur wenn man kalorimetrische Messungen so ausführt, daß bei mehreren Versuchen die Kalorimeterflüssigkeit etwa dieselben Anfangs- und Endtemperaturen hat, sind die Ergebnisse untereinander vergleichbar. Nur dann wird die relative Genauigkeit eine größere.

Nebenbei sei bemerkt, daß man der spezifischen Wärme, die meist einfach als Zahl angegeben wird, die Benennung $\frac{\text{WE}}{{}^0\text{C}\cdot\text{kg}}$ oder $\frac{\text{WE}}{{}^0\text{C}\cdot\text{cbm}}$ geben sollte. Mit dieser eigentümlichen Benennung kann man genau so verfahren, wie mit jeder anderen (Kap. I).

Im englischen Maßsystem ist die Einheit der Wärmemenge (British Thermal Unit, abgekürzt BTU) diejenige, welche 1 engl. Pfund Wasser um 1^0 Fahrenheit erwärmt. Es ist 1 BTU = 0,253 WE = 253 gr cal.

XIII. Messung des Heizwertes von Brennstoffen.

185. **Einheiten.** Das Hauptanwendungsgebiet kalorimetrischer Methoden im Maschinenbau ist die Bestimmung des Heizwertes von Brennmaterialien. Für feste Brennstoffe — Kohle — geschieht das heute allgemein mit Hilfe der Bombe, für flüssige und gasförmige — Benzin oder Petroleum, Leucht- oder Generatorgas und andere — ebenso allgemein mit Hilfe des Junkers-Kalorimeters.

Unter Heizwert versteht man diejenige Wärmemenge, welche die Mengeneinheit des betreffenden Brennstoffes bei vollkommener Verbrennung der Bestandteile erzeugt. Diese Wärmemenge ist unabhängig davon, ob die Verbrennung in Luft oder in reinem Sauerstoff erfolgt, und ob der vorhandene Sauerstoff zur Verbrennung gerade ausreicht oder im Überschuß vorhanden ist, ist auch unabhängig von der Spannung, bei der sie erfolgt, sofern nur nicht die Bildung von CO und anderen selbst noch brennbaren Bestandteilen oder das Unverbranntbleiben schwerer Kohlenwasserstoffe die Folge ungünstiger Bedingungen ist. Die genannten Verhältnisse beeinflussen nur die Verbrennungstemperatur.

Als Mengeneinheit, auf die der Heizwert bezogen wird, dient bei festen und flüssigen Körpern das Kilogramm, wenn man nach Kilogrammkalorien, oder das Gramm, wenn man nach Grammkalorien rechnet; bei gasförmigen Brennstoffen bezieht man den Heizwert auf das Kubikmeter, wobei natürlich das auf 0° und 760 mm BStd reduzierte Volumen einzuführen ist, und zwar pflegt man bei gasförmigen Brennstoffen nach Grammkalorien zu rechnen. Heizwertangaben haben also die Benennungen: $\frac{\text{WE}}{\text{kg}} = \frac{\text{gr cal}}{\text{gr}}$; $\frac{\text{gr cal}}{\text{cbm}}$.

186. **Oberer und unterer Heizwert.** Die maschinentechnisch in Frage kommenden Brennstoffe bestehen durchweg aus Kohlenstoff C, Wasserstoff H, Sauerstoff O und aus Verbindungen dieser drei. Kleine Mengen Schwefel und Phosphor spielen keine Rolle. Bei vollkommener Verbrennung entsteht also Kohlensäure CO_2 und Wasser H_2O. Während die Kohlensäure immer gasförmig abgeht, kann das Wasser entweder als Wasserdampf oder in flüssiger Form den Verbrennungsraum verlassen; das wird namentlich von der Endtemperatur der Abgase abhängen, ob über oder unter 100° C.

Je nachdem nun das Wasser Dampf bleibt oder verflüssigt wird, wird der Heizwert verschieden hoch ausfallen. Entweichender Wasserdampf entführt ja in latenter Form große Wärmemengen — rund 600 WE pro kg Dampf — welche noch als fühlbare Wärme in die Erscheinung treten und nutzbar werden, sobald der Wasserdampf sich niederschlägt.

Der kalorimetrisch gemessene, wie auch der in einer Feuerung nutzbar werdende Heizwert ist also kleiner, wenn das Wasser als Dampf abgeht, größer, wenn es sich zu verflüssigen Gelegenheit hat.

Den auf Wasserdampf als Verbrennungsprodukt bezogenen nennt man den unteren Heizwert, der andere heißt der obere Heizwert. Beide unterscheiden sich um das mit 600 multiplizierte Gewicht Wasser, welches sich bei der Verbrennung der Mengeneinheit Brennstoff bildet, oder schon hygroskopisch im Brennstoff enthalten war.

187. **Welcher von beiden Heizwerten ist maßgebend?** Es ist nun die Frage, ob der untere oder der obere Heizwert bei der Bewertung des Brennstoffes in Betracht zu ziehen ist. In Deutschland pflegt man den unteren als den maßgebenden anzusehen, in Amerika dagegen den oberen — woraus allein schon folgt, daß sich für jeden etwas sagen läßt.

Die Frage ist auch nicht belanglos insofern, als der Unterschied zwischen beiden Heizwerten recht bedeutend ist: beide verhalten sich bei Steinkohle etwa wie 7500 zu 7200 WE, bei Braunkohle wie 4500 zu 4200, bei Petroleum wie 10500 zu 9750, bei Leuchtgas wie 5600 zu 5000 WE. Der Unterschied wird um so größer, je mehr Wasser und namentlich je mehr Wasserstoff der Brennstoff prozentual enthält.

Für die Anwendung des unteren Heizwertes spricht es, daß ja in Wahrheit in jeder Feuerungsanlage, auch in Verbrennungsmotoren, die Verbrennungsgase mit mehr als 100° abgehen, so daß alles Wasser dampfförmig ist und dessen latente Wärme verloren geht. Zwar könnte man einwenden, daß dieser Verlust nicht Schuld des Brennstoffes sei, sondern der Feuerungsanlage: Warum nutzt man denn nicht die Abgase bis unter 100° herunter aus? Und wenn man ihrer Wärme noch zur Erzeugung des Essenzuges bedarf, warum verwendet man denn nicht anstatt der Esse einen Ventilator? Dieser Einwand ist nicht stichhaltig. Wenn man auch die Abgase unter 100° herunter abkühlt, so werden sie doch immerhin mit Feuchtigkeit gesättigt abziehen. Da nun die Abgase ein ziemlich bedeutendes Volumen einnehmen, so kann auch bei geringen Temperaturen noch alles oder doch das meiste Wasser in Dampfform abgehen. Für Steinkohle beispielsweise ergibt eine Rechnung, die wir hier im einzelnen nicht wiedergeben können, daß bei 40° C Abgastemperatur noch alles Wasser als Dampf fortgehen würde (aus 1 kg Kohle entstehen 0,5 kg H_2O und bei $1^1/_2$fachem Luftüberschuß 9,5 cbm Rauchgas; jedes Kubikmeter Rauchgas kann nach den Dampftabellen 0,051 kg Dampf aufnehmen). Bei 20° Abgastemperatur würde freilich gut die Hälfte des Wassers niedergeschlagen werden. Etwas günstiger stellt sich die Sache für Petroleum mit seinem größeren H-Gehalt: hier könnte schon bei 40° fast die Hälfte des Wassers kondensieren und so seine latente Wärme nutzbar werden. In jedem Fall aber, sieht man, wäre es unmöglich, den oberen Heizwert voll auszunutzen. Praktisch nutzt man jetzt nur den unteren aus, theoretisch

ist es unmöglich, den oberen je zu erreichen — das hat bei uns dahin geführt, den unteren Heizwert als maßgebend anzusehen.

Andere Erwägungen jedoch, deren Berechtigung man sich ebensowenig wird verschließen können, führten zur Annahme des oberen Heizwertes in Amerika. Warum soll man bei einer Gasmaschine die latente Wärme des Wasserdampfes der Maschine gutbringen, während bei einer Dampfmaschine das nicht geschieht? Bei der Dampfmaschine bezieht man den Wirkungsgrad auf die gesamte im zugeführten Dampf enthaltene Wärmemenge, obwohl man weiß, daß sie nicht ganz ausgenutzt werden kann, selbst theoretisch nicht. In der Gasmaschine leistet der entstehende Wasserdampf genau so gut Arbeit wie die anderen entstandenen Verbrennungsprodukte und genau so gut wie in der Dampfmaschine; das erkennt man, wenn man an eine Gasmaschine denkt, die mit reinem Wasserstoff gespeist wird und bei der reiner Sauerstoff zur Verbrennung zugeführt wird. Daher sollte man auch bei einer Gasmaschine die gesamte zugeführte Wärmemenge, den oberen Heizwert, als eingebracht in Rechnung stellen. Und wenn man fürchtet, durch Benutzung des oberen Heizwertes dem Dampfkessel etwas zur Last zu legen, was eigentlich der Brennstoff verschuldet, so bedenke man, daß auch eine Dampfmaschine besser arbeiten würde, wenn der Kondensator absolutes Vakuum erzeugte, statt daß er noch einen gewissen Gegendruck beläßt: das rechnet man aber der Dampfmaschine nicht zugute.

Die Wirkung der verschiedenen Teile einer Anlage greift eben so vielfach ineinander, daß es unmöglich ist, nach allen Seiten Gerechtigkeit zu üben. Der obere Heizwert ist eine Eigenschaft des betreffenden Brennstoffes, der untere ist eine andere Eigenschaft desselben. Es ist nicht möglich, den Wert des Brennstoffes für alle verschiedenen Fälle durch nur eine seiner Eigenschaften zahlenmäßig auszudrücken. Je nach dem Zweck ist die eine oder die andere Eigenschaft die wichtigere.

Wenn wir unter diesen Umständen dem Heizwert den Vorzug geben möchten, der viel einfacher zu bestimmen ist, und das ist der obere, so haben wir uns ja doch einfach dem herrschenden Gebrauch zu fügen, welcher nun einmal die Benutzung des unteren vorschreibt.

Die Annahme der latenten Wärme des Wasserdampfes zu immer rund 600 WE hat hierbei auch mehr den Vorzug der Einfachheit als den der Korrektheit.

188. **Übersicht der Meßmethoden.** Den Heizwert fester Brennstoffe bestimmt man mit Hilfe des Bombenkalorimeters. Ein gewogenes Quantum des Brennstoffes wird in einem stählernen Behälter, der Bombe, mit komprimiertem Sauerstoff plötzlich verbrannt. Die erzeugte Wärmemenge erwärmt teils die Bombe selbst, teils das sie umgebende, abgewogene Wasserquantum; aus der Temperaturerhöhung kann man die erzeugte Wärmemenge finden. — Man hat versucht, die unbequeme Bombe durch mehr technische Instrumente zu ersetzen, insbesondere an die Stelle des komprimierten Sauerstoffes

einen Sauerstoffstrom treten zu lassen, in dem die Kohle allmählich verbrennt; die erzeugte Wärme wird dann wieder an Wasser übertragen. Diese Instrumente haben sich kein Zutrauen bei uns erworben, man wirft ihnen vor, die Kohle verbrenne häufig nicht vollkommen. Wir gehen deshalb nicht auf sie ein und erwähnen hier nur das Carpenter-Kalorimeter, beschrieben Z. V. D. I. 1897, S. 1446, welches in Amerika viel benutzt und sehr gelobt wird.

Besonders besprechen müssen wir die Probenahme bei festen Brennstoffen. Das Kalorimeter kann natürlich nur den Heizwert des kleinen Kohlequantums ermitteln, das man darin verbrennt. Ob diese Probe einen Durchschnitt der gesamten bei einem langen Verdampfungsversuch benutzten Kohle darstellt, hängt von der bei der Probenahme aufgewendeten Sorgfalt ab.

Den Heizwert gasförmiger und flüssiger Brennstoffe bestimmt man ganz allgemein mit dem Junkers-Kalorimeter. Der Brennstoff verbrennt kontinuierlich; der Strom der Abgase hat in einem Röhrensystem Gelegenheit, seine Wärme auf einen kontinuierlichen Wasserstrom zu übertragen. Durch Messen der Brennstoff- und Wassermengen, sowie der Temperaturerhöhung des Wassers findet man den Heizwert.

Bei jedem dieser Kalorimeter erhält man zunächst den oberen Heizwert. Um den unteren zu finden, hat man das aus den Verbrennungsprodukten kondensierte Wasser zu messen und seine latente Wärme abzuziehen.

189. **Krökersche Bombe.** Die Bombe wird meist in der von Kröker angegebenen Form benutzt, wo sie die Bestimmung des entwickelten Wassers gestattet.

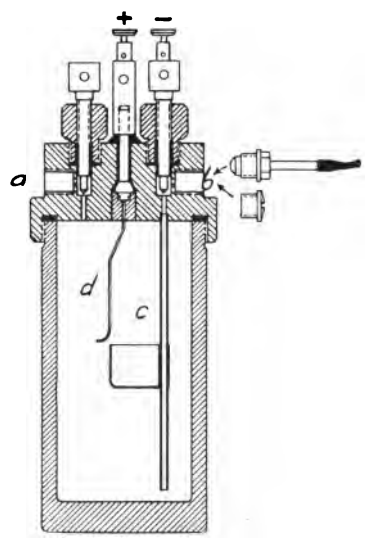


Fig. 173.
Mahler-Krökersche Bombe.

Die Krökersche Bombe (Fig. 173) besteht aus einem innen emaillierten Stahlbehälter mit abschraubbarem Deckel. Der Deckel hat zwei Bohrungen. Diese sind durch kleine Ventile verschließbar, sie münden bei *a* und *b*, und man kann dort Röhrchen anschrauben, um den Verbrennungssauerstoff einzuführen, und um später das Verbrennungswasser zu entnehmen. Sonst setzt man kleine Verschlußschrauben auf *a* und *b*, um Staub abzuhalten. Das Platinrohr *c* sorgt dafür, daß der Sauerstoff durch die ganze Bombe streichen muß. Es bildet gleichzeitig den einen Pol für die elektrische

Zündung; der andere, *d*, geht isoliert durch den Deckel. Bei + und — wird die Stromquelle angeschlossen. Ein in die abgewogene Kohle gebetteter Eisendraht wird mit den Enden um die beiden Pole geschlungen. Sein Erglühen bewirkt die Zündung der Kohle, nachdem man sie in der Bombe in eine Sauerstoffatmosphäre von mindestens 15 at gebracht hat. Sauerstoff ist, auf 100 at komprimiert, im Handel zu haben.

Bei der Zündung steht die Bombe in einem Kalorimeter. Dies ist ein mit abgewogenem Wasser gefülltes Metallgefäß, zum Schutz gegen Wärmestrahlung mit einem Holzmantel und Deckel versehen, auch wohl noch mit einem Wassermantel. Ein Rührwerk sorgt für gleiche Temperatur des ganzen Wasserinhaltes; ein fein geteiltes Thermometer läßt sie ablesen. Nachdem man die gefüllte Bombe eingesetzt hat, wartet man den Temperaturausgleich des ganzen Systems ab. Dann beobachtet man einige Minuten lang die kleinen Änderungen, welche noch infolge von Strahlung vor sich gehen, indem man alle Minuten das Thermometer abliest (Vorversuch); mit diesen Ablesungen fährt man fort, nachdem man gezündet hat, bis die Temperatur nicht mehr steigt (Hauptversuch) und noch einige Minuten länger (Nachversuch). Der Hauptversuch gibt die Temperaturzunahme durch Verbrennung, Vor- und Nachversuch sollen den Einfluß der Strahlung klarlegen. Wenn im Vorversuch minutlich eine Temperatursteigerung $+ 0{,}03^0$, im Nachversuch eine minutliche Temperatursenkung $- 0{,}01^0$ beobachtet wurde, so nimmt man am einfachsten an, daß während des Hauptversuches um $+ 0{,}01^0$, das arithmetische Mittel, schon ohne die Zündung die Temperatur minutlich gestiegen wäre. Bei einer Dauer des Hauptversuches von 7 Minuten hätte man $7 \cdot 0{,}01^0 = 0{,}07^0$ von der beobachteten Temperaturerhöhung abzuziehen, um diejenige Zunahme zu erhalten, welche wirklich auf Rechnung der Verbrennung kommt. Rechnet man mit dieser korrigierten Temperaturerhöhung, so ist der obere Heizwert gleich $\frac{\text{Wassergewicht} \times \text{korr. Temperaturzunahme}}{\text{Kohlegewicht}}$. Wir werden indes sogleich sehen, daß beim Wassergewicht noch der sogenannte Wasserwert des Kalorimeters zu berücksichtigen ist.

Wollen wir den oberen Heizwert kennen, so ist der Versuch zu Ende. Anderenfalls beginnt nun die langwierigere Arbeit der Messung des gebildeten Wassers. Zu dem Zweck schraubt man bei *b*, Fig. 173, ein kurzes Rohrende auf und schließt mittels Gummischlauches eine abgewogene Chlorkalziumvorlage an. Man öffnet vorsichtig das Ventil, die Spannung entweicht durch die Vorlage, die Feuchtigkeit wird durch das Chlorkalzium absorbiert. Weiterhin saugt man Luft durch die Bombe und die Vorlage und erwärmt gleichzeitig die Bombe längere Zeit in einem Ölbade auf etwas über 100^0; dann wird alles Wasser mitgenommen und vom Chlorkalzium absorbiert. Zum Schluß stellt man die Gewichtszunahme des Chlorkalziumrohres fest. Das Ansaugen geschieht mittels Aspirators, Gummi-

gebläse oder Wasserstrahlluftpumpe. Damit die angesaugte Luft trocken in die Bombe hineinkommt, wird eine zweite Chlorkalziumvorlage auf der anderen Seite der Bombe angebracht. Ist nun W das ermittelte Wassergewicht, so ist die gemessene Wärmemenge um 600 W zu vermindern.

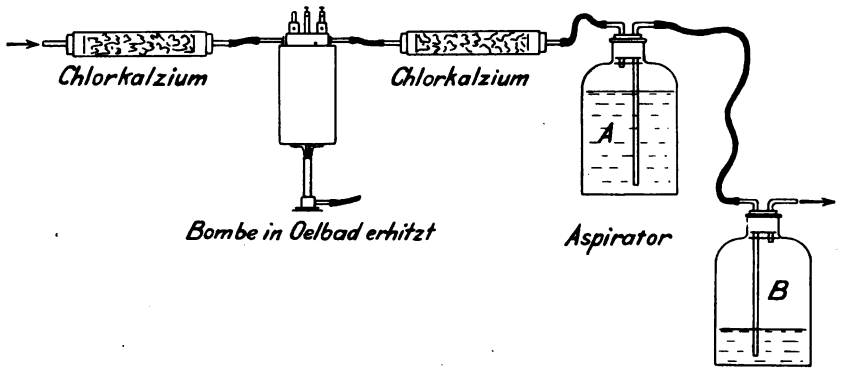


Fig. 174.

— Der Aufbau des Apparates für die Wasserbestimmung ist in Fig. 174 dargestellt.

190. **Aspirator.** Ein Aspirator, wie er eben erwähnt wurde, dient zum Ansaugen von Gas und ist häufiger zu benutzen. Man kann ihn aus zwei Glasflaschen herstellen, in deren doppelt durchbohrte Stopfen (am besten Gummi) je ein kurzes und ein langes Glasrohr luftdicht eingesetzt sind. Die beiden langen Rohre werden durch einen wassergefüllten Schlauch verbunden, nachdem man eine Flasche ganz und die andere so weit mit Wasser gefüllt hatte, daß das lange Rohr eintaucht (Fig. 174). Stellt man die volle Flasche A hoch, so wirkt der Schlauch als Heber und das übertretende Wasser saugt Gas in die Flasche A. Will man nachher etwa dieses Gas gebrauchen, so drückt man es aus der Flasche A, indem man B hoch und A tief stellt. Zum Absperren der Schläuche dienen bei Bedarf Quetschhähne. — Beim Überschieben von Gummischläuchen über Röhren mache man die Röhren naß.

191. **Handhabung der Bombe.** Die Handhabung der Bombe können wir in folgende kurze Anweisung zusammenfassen: Brikett mit eingelegtem eisernen Zünddraht herstellen (siehe später) und wägen, nötigenfalls Eisendraht vorher wägen. Bombe aus Chlorkalziumglocke nehmen, worin sie aufbewahrt wird, Brikett mittels Zünddraht anbinden, ein kleiner Tiegel wird unter ihn gehängt. Deckel zuschrauben, sanft, aber kräftig; ein Schlüssel liegt der Bombe bei. Sauerstoffflasche bei a anschließen, beide Ventile (Fig. 173) öffnen, Sauerstoffflasche öffnen, Sauerstoff durchblasen lassen. Ventil bei b schließen, Manometer beobachten; sind 15 at erreicht, Sauerstoffflasche schließen, Ventil bei a schließen. Bombe losnehmen,

Löcher bei *a* und *b* durch kleine Schrauben verschließen; elektrische Leitung anschließen, Bombe ins Kalorimeter, in dem so viel Wasser abgewogen ist, daß Bombe bedeckt ist; Blasen dürfen nicht aufsteigen, sonst ist die Bombe undicht. Rührwerk in Gang gesetzt; mechanisch oder von Hand. Thermometer von Minute zu Minute ablesen, bis Beharrung vorhanden; dann Zündung; weiter ablesen bis Temperaturmaximum erreicht (Hauptversuch) und 7 bis 10 Minuten länger (Nachversuch). Bombe aus dem Kalorimeter in Ölbad setzen, Ansatzrohre bei *a* und *b* anschrauben, Chlorkalziumvorlagen beiderseits anschließen, die bei *a* sei gewogen. Druck vorsichtig durch Ventil bei *a* aus Bombe auslassen, Bombe wieder schließen. Aspirator auf der Seite von *a* anschließen, Ventil bei *a* öffnen, dann Ventil bei *b* öffnen. Die Reihenfolge ist wesentlich, damit nicht Gase an der falschen Seite der Bombe austreten. Aspirator muß etwa $^1/_2$ Stunde lang langsam saugen; während der letzten 15 Minuten Ölbad auf 105° bis 110° erwärmen. Zum Schluß die eine Vorlage wieder wägen. Bei sehr nasser Kohle (Braunkohle) muß man mehrere Chlorkalziumvorlagen hintereinanderschalten, um sicher alles Wasser aufzufangen, die letzte darf keine Gewichtszunahme zeigen.

192. **Auswertung; Korrektionen; Beispiel.** Bei der Auswertung ist noch einiges zu beachten.

Zunächst wird die bei der Verbrennung entstehende Wärme nicht nur auf das Wasser des Kalorimeters, sondern zum Teil auf das Metall der Bombe und des Kalorimeters übertragen, dieses wird mit erwärmt. Wenn zum Erwärmen der Metallteile um 1° eine Wärmemenge von 313 Kalorien nötig ist, so nennt man diese Zahl 313 den Wasserwert des Kalorimeters: die Bombe absorbiert ebensoviel Wärme, wie 313 gr Wasser täten. Man hat bei der Berechnung die abgewogene Wassermenge um den Wasserwert des Kalorimeters zu vermehren und mit dieser fingierten Wassermenge zu rechnen.

Man ermittelt den Wasserwert nicht rechnerisch aus den Gewichten der Metallteile und ihrer spezifischen Wärme, sondern viel besser experimentell, indem man einen Stoff in der Bombe verbrennt, dessen Heizwert bekannt ist, und zusieht, welchen Wasserwert man annehmen muß, um richtige Ergebnisse zu erhalten. Es ist selbstverständlich, daß man solche Fundamentalversuche, welche allen späteren als Grundlage dienen sollen, besonders sorgfältig und zur Kontrolle mehrfach ausführt. — Als Probebrennstoffe dienen chemisch reine Benzoesäure mit 6322 WE oberem Heizwert, Kampfer mit 9292 WE, oder andere.

Weiterhin wird man beachten müssen, daß nicht nur die Kohle, sondern auch der zur Zündung eingebettete Eisendraht Wärme erzeugt. Man hat erstens das Gewicht des Eisendrahtes vom Kohlengewicht abzuziehen, um zu finden wieviel Kohle verbrannt ist; man hat zweitens die vom Eisen erzeugte von der gesamten Wärmemenge abzuziehen, um

die von der Kohle erzeugte Wärmemenge zu bekommen. 1 gr Eisen gibt bei vollkommener Verbrennung 1600 gr cal.

Einen sehr kleinen Fehler macht der Umstand, daß der zur Verbrennung benutzte Sauerstoff etwas feucht ist: diese Feuchtigkeit mißt man nachher, als wenn sie der Kohle entstammte. Der Fehler kann unbeachtet bleiben.

Den Gang einer Berechnung geben wir nun in folgendem Beispiel: Braunkohle, Gewicht des Briketts 1,421 gr, des Eisendrahtes 0,02 gr, des Kohlebriketts allein also 1,401 gr. Wasserwert des Kalorimeters 449 gr (bekannt); Wassermenge um die Bombe 2000 gr, zusammen 2449 gr. Lufttemperatur 17°. Ablesungen am Thermometer des Kalorimeters:

Vorversuch			Hauptversuch			Nachversuch		
Zeit	°C	Diff.	Zeit	°C	Diff.	Zeit	°C	Diff.
3 h 5	15,62	0,02	3 h 11	15,70	0,02	3 h 19	18,78	0
6	15,64	0,01	12	17,1	1,4	20	18,78	0
7	15,65	0,01	13	18,2	1,1	21	18,77	−0,01
8	15,66	0,01	14	18,6	0.4	22	18,77	0
9	15,67	0,01	15	18,71	0,11	23	18,76	−0,01
10	15,68		16	18,76	0,05	24	18,76	0
Zündung			17	18,77	0,01	25	18,75	−0,01
			18	18,78	0,01			

Temperaturzunahme: $18{,}78 - 15{,}68 = 3{,}10°$ in 8 Minuten. Korrektion für Strahlung: Im Vorversuche strahlte in einer Minute 0,01° ein, im Nachversuch in einer Minute 0,005° aus: also dürfte im Hauptversuch minutlich $\frac{0{,}01 - 0{,}005}{2} = 0{,}0025°$ eingestrahlt sein, d. h. in 8 Minuten Versuchsdauer $8 \cdot 0{,}0025 = 0{,}02°$. Ohne Strahlung wäre die Temperaturzunahme nur 3,08° geworden. Es werden daher $2449 \cdot 3{,}08$ gr cal erzeugt, von diesen kommen 40 cal auf die 0,02 gr Eisendraht, daher haben 1,401 gr Kohle eine Wärmemenge von $2449 \cdot 3{,}08 - 40$ gr cal erzeugt: Der obere Heizwert von 1 kg Kohle ist $\frac{2449 \cdot 3{,}08 - 40}{1{,}401} = 5360$ WE.

Nun hatte man aber noch, um den unteren Heizwert zu finden, das gebildete Kondenswasser in einem Chlorkalziumrohr aufgefangen. Das Rohr wog vor der Benutzung 28,393 gr, nachher 29,162 gr. Also hatten sich 0,77 gr Wasser gebildet, und zwar aus 1,401 gr Kohle; aus einem Kilogramm Kohle entstehen 0,55 kg Wasser und entführen, als Dampf durch den Schornstein entweichend, $0{,}55 \cdot 600 = 330$ WE. Der untere Heizwert ist $5360 - 330 = 5030 \frac{\text{WE}}{\text{kg}}$.

193. **Probenahme.** Es wurde schon darauf hingewiesen, daß die Behandlung der Probe mit das Wichtigste an der ganzen Untersuchung ist. Das bezieht sich einerseits darauf, daß die entnommene Probe den Durchschnitt der zu untersuchenden Kohle darstellen muß, andererseits darauf, daß die Probe nach der Entnahme sich nicht irgendwie verändert haben darf; besonders darf sie nicht Wasser verloren haben, ohne daß dies besonders gemessen wäre.

Man entnimmt die Probe meist so, daß man bei einem längeren Versuch von jedem der herbeigeschafften Kohlenkarren eine Schaufel zurücklegt; am Schluß des Versuches wird dieser ganze Probehaufen grob zerkleinert, gut durchgemischt, dann flach ausgebreitet und etwa ein Viertel abgeteilt, so jedoch, daß nicht der zu diesem Viertel gehörige Grus zurückbleibt. Dieses Viertel wird weiter zerkleinert, gemischt, ein Bruchteil abgeteilt, und so fort, bis man 5 oder 10 kg ins Laboratorium schickt.

Was die Veränderlichkeit anbetrifft, so ist Steinkohle wenig empfindlich; immerhin verwahre man die von den einzelnen Karren genommenen Mengen in einer bedeckten Kiste, bis man die Mischung vornimmt, und löte die endgültige Probe zur Versendung oder Aufbewahrung in Blechbüchsen oder tue sie in Glasflaschen. Sehr veränderlich ist stark wasserhaltige Braunkohle, Torf, Holz. Man beobachte einmal, wie es nicht möglich ist, manche Braunkohlensorte an der Luft zu wägen, weil sie von Minute zu Minute leichter wird. Hier muß man das Mischen und Zerkleinern unterlassen, und sich mit dem Aussuchen von Stücken begnügen, die man sofort luftdicht aufhebt.

Da so nasse Kohle gar nicht oder schlecht in der Bombe verbrennt, so läßt man sie erst an der Luft trocknen, ermittelt aber den prozentualen Gewichtsverlust beim Trocknen. Das Wasser, welches die Kohle in dieser Weise verloren hat, wird für die Berechnung des unteren Heizwertes ebenso in Betracht zu ziehen sein, wie das später aus der Bombe herauskommende. Diese Berücksichtigung geschieht etwa wie folgt: 13,52 kg Braunkohle trockneten an der Luft in 2—3 Tagen auf 8,91 kg aus; Gewichtsverlust 4,61 kg = 51,7 % der verbliebenen Kohle. Aus der trockenen Kohle wird nun 1,021 gr verbrannt, liefert einen oberen Heizwert von $3041 \frac{\text{WE}}{\text{kg}}$, und insgesamt 0,670 gr Wasser. Hätten wir die Kohle nicht getrocknet gehabt, so wäre die gleiche Kohlenmenge 51,7% schwerer gewesen, hätte also 0,528 gr mehr gewogen, aber auch 0,528 gr mehr Wasser gegeben. Der obere Heizwert der ursprünglichen Kohle war $3041 \cdot \frac{100}{151{,}7} = 2005 \frac{\text{WE}}{\text{kg}}$. 1 gr Kohle hätte dann $\frac{0{,}670 + 0{,}528}{1{,}021 + 0{,}528} = 0{,}774$ gr Wasser gegeben; deren latente Wärme ist 464 gr cal, und der untere Heizwert der ursprünglichen Kohle ist $2005 - 464 = 1541 \frac{\text{WE}}{\text{kg}}$.

Zur Einführung in die Bombe umwickelt man Braunkohle mit Eisendraht, den man an den Polen befestigt. Steinkohle stößt man ganz fein, und drückt in einer zur Bombe gehörigen Presse ein Brikett daraus, in dem der Eisendraht eingebettet wird. Dieser dient dann, wie erwähnt, auch zur Zündung. Koks oder Anthrazit, die nicht zusammenhaften, kann man bisweilen als Pulver verbrennen, oder man formt ein Brikett unter Zuhilfenahme von Syup oder Teer. Ganz arme Schlacken, die nicht für sich brennen, muß man mit besser brennbaren Stoffen mischen. In beiden Fällen muß man natürlich die Wärmeerzeugung der Beimischung berücksichtigen, dazu also deren Heizwert und das Mengenverhältnis der Mischung kennen.

194. **Einfluß der Strahlung.** Der wunde Punkt bei der Methode, wie übrigens bei jeder Kalorimetrierung, ist die Unsicherheit, in der man sich über den Einfluß der Strahlung befindet. Wir haben eine überaus einfache Art der Korrektion angewendet, die aber auch entsprechend primitiv ist. Es gibt umständlichere, theoretisch korrektere Methoden zur Berücksichtigung der Strahlung. Das beste wird aber immer sein, die Strahlung möglichst zu beseitigen, indem man dafür sorgt, daß der Temperaturunterschied zwischen Kalorimeter und Umgebung klein ist, und indem man die Kalorimetrierung an einem geschützten Ort vornimmt, wo nicht Zug auftritt.

Der Rumfordsche Kunstgriff besteht darin, dafür zu sorgen, daß die Zimmertemperatur ebensoviel über der Anfangs- wie unter der Endtemperatur des Kalorimeters liegt. Mit einiger Annäherung wird dann im ersten Teil des Versuches ebensoviel Wärme einstrahlen, wie im zweiten ausstrahlen.

Nur bei sorgsamster Beobachtung aller Vorsichtsmaßregeln wird man mit der Bombe einigermaßen zufriedenstellende Ergebnisse erzielen. Man wird bald bemerken, daß die Arbeit mit der Bombe recht schwierig ist und viel Übung erfordert. Wegen ihrer Langwierigkeit und ihrer ganzen Art nach gehört sie mehr ins physikalisch-chemische als ins technische Gebiet. Oft wird man deshalb vorziehen, die Kohlenprobe an eine Stelle zu schicken, die speziell auf Heizwertbestimmungen eingerichtet ist — das sind die chemisch-technischen Institute der Hochschulen, die Dampfkesselüberwachungsvereine und andere.

195. **Zusammensetzung der Kohle.** Im Anschluß an die Heizwertbestimmung pflegt man oft noch eine Untersuchung der Kohle auf ihre wesentliche Zusammensetzung zu machen; besprochen werde kurz die Bestimmung des Wassergehaltes, ferner des Gehaltes an Asche, an Kohlenstoff, an brennbarer Substanz.

Bei Bestimmung des Wassergehaltes kann man schrittweise vorgehen, indem man die Kohle zunächst etwa 14 Tage unbedeckt und ausgebreitet im warmen Zimmer stehen läßt und den Gewichtsverlust dann feststellt.

Die Kohle ist nach dieser Zeit als lufttrocken zu betrachten. Den Gewichtsverlust bezeichnet man wohl als die grobe Feuchtigkeit der Kohle.

Die so behandelte Kohle enthält immerhin noch Wasser, auch abgesehen davon, daß in ihren festen Bestandteilen Wasserstoff und Sauerstoff vorhanden sind, die man als zu Wasser vereinigt sich vorstellen kann. Wenn man nun eine kleinere Menge der lufttrockenen Kohle in einem Porzellantiegel eine Stunde lang sehr vorsichtig, in Öl- oder Luftbad, auf 105 bis höchstens 110° erhitzt, so entweicht das noch vorhandene Wasser. Der Rest heißt trockene Substanz. Unter hygroskopischem Wasser versteht man den gesamten bisher erlittenen Gewichtsverlust, also einschließlich der schon vorher bestimmten groben Feuchtigkeit. Doch kann man sich leicht durch den Geruch überzeugen, daß nicht nur Wasser, sondern auch andere Substanz selbst bei vorsichtigem Erhitzen auf 110° entweicht. Wie groß der so entstehende Fehler ist, ist uns unbekannt; jedenfalls aber wäre es richtiger, die Erhitzung unter Vakuum und dann auf eine entsprechend geringere Temperatur vorzunehmen.

Beim Erhitzen in einem dicht verschlossenen Tiegel, einige Minuten über dem Bunsenbrenner zur Rotglut und dann gleich weiter und ebenso lange vor dem Lotrohr zur Weißglut, entweicht nun die flüchtige Substanz und zurück bleibt eine Art Koks, verschieden nach der Kohlenart. Doch sei ausdrücklich bemerkt, daß der Rückstand nicht mehr allen Kohlenstoff der Kohle enthält, weil ja die entweichenden Gase zumeist Kohlenwasserstoffe sind. Diese Bestimmung wird für uns meist wenig Wert haben. Wir können sie daher nach Bedarf auslassen und direkt den Aschengehalt bestimmen.

Den Aschengehalt bestimmt man, indem man den Rückstand, das ist also entweder die trockene Substanz oder den Koks, in offenem Tiegel unter Umrühren so lange stark erhitzt, bis keine Gewichtsverminderung mehr stattfindet; der Rest ist Asche, d. h. unverbrennlich.

Wie man sieht, erhält man bei dieser Folge von Untersuchungen den gesamten Kohlenstoffgehalt der Kohle nicht. Man wünscht ihn gelegentlich zu kennen, weil man mit seiner Hilfe die Menge der Rauchgase und daher die Essenverluste bestimmen kann. — Man ermittelt den Gesamtkohlenstoff am einfachsten gleichzeitig mit dem unteren Heizwert. Die Verbrennungsprodukte der Bombe sollen ein Chlorkalziumrohr durchlaufen, um das Verbrennungswasser zu bestimmen (§ 189). Das so getrocknete Gas läßt man nun noch durch ein Kalirohr, dann nochmal durch ein Chlorkalziumrohr gehen und nun erst in den saugenden Aspirator treten. Das Kalirohr enthält entweder mit Kalilauge getränkte Bimssteinstücke oder Stücke von Ätzkali. In diesem Rohr wird die in der Bombe gebildete Kohlensäure absorbiert; dadurch nimmt die Röhre an Gewicht zu. Gleichzeitig aber entführt das durchströmende Gas Feuchtigkeit aus dem Kalirohr, diese zurückzuhalten ist nochmal ein Chlorkalziumrohr nötig. Die Gewichts-

zunahme der vorher schon gewogenen Kombination aus Kali- und zweitem Chlorkalziumrohr ist also die aus dem Kohlebrikett entwickelte CO_2. Wegen der Atomgewichte sind je 44 Teile CO_2 enstanden aus 12 Teilen C; daher kann man berechnen, wieviel C im Kohlebrikett enthalten war.

Auch der Wasserstoffgehalt des Brennstoffes ist verhältnismäßig einfach zu berechnen. Das Wasser nämlich, welches aus der Krökerschen Bombe bei Bestimmung des unteren Heizwertes entwich, war zum Teil schon hygroskopisch im Brennstoff enthalten — diesen Prozentsatz zu bestimmen ist nach dem soeben Gesagten ausführbar — zum Teil ist es erst aus dem Wasserstoff entstanden. Dieser letztere Teil ist die Differenz zwischen dem gesamten und dem hygroskopischen Wasser. Aus ihm folgt der Wasserstoffgehalt der Kohle, er ist ein Neuntel jener Differenz.

Zu bemerken bleibt indes, daß sich der Techniker bei solchen Untersuchungen auf chemisches Gebiet begibt, auf dem er voraussichtlich zunächst Lehrgeld wird zahlen müssen. Oft wird man vorziehen, die Kohle von einem chemischen Institut untersuchen zu lassen.

Alle Resultate der hier angedeuteten Untersuchungen drückt man in Prozenten entweder der ursprünglichen, oder der lufttrockenen Kohle aus. Es erfordert bedeutende Aufmerksamkeit, will man nicht beim Berechnen Verwirrung anrichten, indem man bald diesen, bald jenen Wert als 100% einführt.

196. **Junkers-Kalorimeter.** Das Junkerssche Kalorimeter für gasförmige Brennstoffe ist in Fig. 175 dargestellt. Im Innern des Kalorimeters verbrennt das zu untersuchende Gas, seine Menge mißt man mittels einer Gasuhr. Die Verbrennungsgase gehen aufwärts, dann durch ein Bündel von Rohren wieder abwärts, und entweichen bei A, wo man ihre Temperatur t_r messen kann. Sie haben inzwischen die erzeugte Wärme an Wasser abgegeben, welches das genannte Rohrbündel außen umspült. Dieses Kühlwasser durchläuft in gleichmäßigem Strome den Apparat, man mißt mit Hilfe der Thermometer t_e und t_a seine Ein- und Austrittstemperatur. Beobachtet man noch, durch Wägen oder mit Mensur, wieviel Wasser durch das Kalorimeter fließt, während gerade eine bestimmte Menge Gas verbrennt, so hat man einfach: obererer Heizwert $= \frac{\text{Wassermenge} \times \text{dessen Temperaturzunahme}}{\text{Gasmenge}}$.

Dabei ist Voraussetzung, daß die Verbrennungsgase bei A mit Zimmertemperatur entweichen, wofür man eben zu sorgen hat. Das Gasvolumen ist natürlich auf 0° und 760 mm zu reduzieren.

Im einzelnen ist über das Kalorimeter zu bemerken: Der gleichmäßige Wasserstrom wird dadurch ermöglicht, daß das Wasser unter dem konstanten Druck von der Höhe h zirkuliert; bei x nämlich steht das ablaufende Wasser stets bis zur Kante des Trichters; bei y steht das zulaufende bis an die Kante s des inneren Ringes, wenn man dafür sorgt, daß etwas Wasser im Überschuß durch z zufließt, der Überschuß läuft über die Kante

s fort. Steht also das Wasser unter konstantem Druck, so kann man mit dem Hahne H die Druckflußmenge regeln. — Bevor das Wasser an

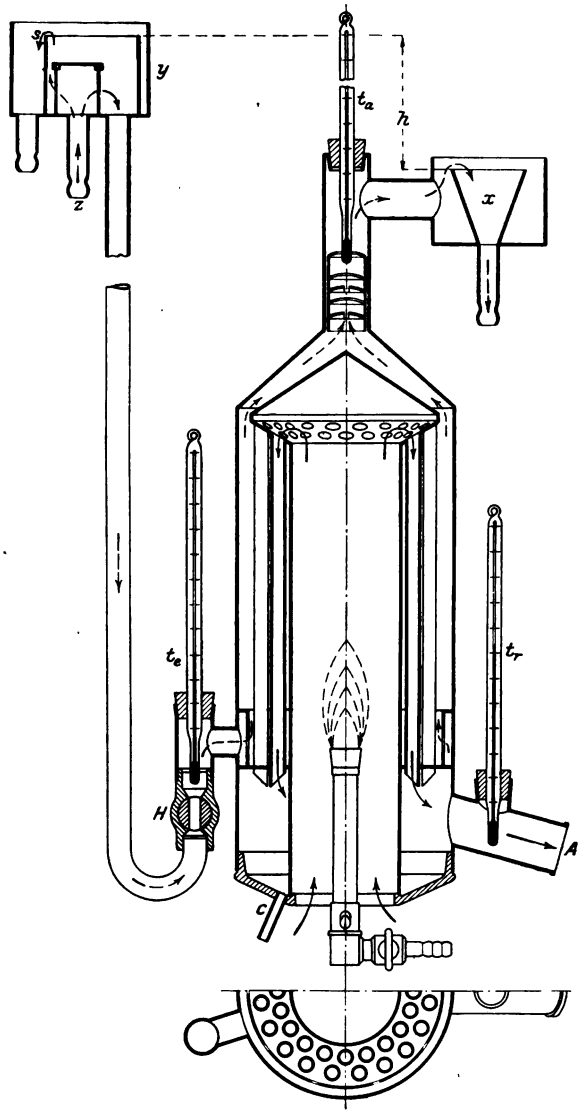


Fig. 175.

das Thermometer t_a kommt, wird es gründlich durchgemischt durch eine Anzahl flacher Kappen, die mit kreuzweise versetzten Schlitzen versehen sind. — Der Brenner ist ein Bunsenbrenner, dessen Luftschlitze man

durch einen Stellring mehr oder weniger schließen kann. Auf die Wärmeproduktion ist es ohne Einfluß, ob die Verbrennung mit leuchtender Flamme erfolgt, sofern nur nicht Rußbildung stattfindet. Am besten aber vermeidet man Rußbildung bei blauer Flamme.

Es wird wohl angegeben, man solle den Rumfordschen Kunstgriff anwenden, der darin besteht, so einzuregulieren, daß die Zimmertemperatur gerade mitten zwischen Zu- und Abflußtemperatur des Kühlwassers liegt. Dann vermiede man am besten Strahlungsverluste. Doch gehen bei diesem Verfahren stets die Gase zu kalt ab, sie pflegen die Temperatur des zufließenden Kühlwassers anzunehmen. Besser ist es, das Kühlwasser mit Zimmertemperatur zufließen zu lassen. Gegen Strahlung ist das Kalorimeter durch einen umgebenden ruhenden Luftmantel möglichst geschützt; dieser ist in der Figur fortgelassen.

Es ist leicht zu sehen, daß man besser mit großer Wassermenge und geringer Temperaturzunahme desselben arbeitet, als umgekehrt, der Strahlung wegen.

Zu dem Kalorimeter gehört eine Gasuhr, Thermometer und Mensuren.

197. **Messung des Kondenswassers.** Die bisherige Messung ergab uns den oberen Heizwert. Um den unteren zu finden, ist bei c ein Stutzen angebracht, aus welchem man das Kondenswasser abziehen kann, welches sich in dem Rohrbündel aus den abgekühlten Gasen niederschlägt. Wir haben nur dieses Kondenswasser noch für die gleiche Zeit zu messen wie Kühlwasser und Gas. Das Produkt: 600 mal der Kondenswassermenge stellt die beim Kondensieren frei gewordene Wärme dar, die in Abzug zu bringen ist. Es ist: Unterer Heizwert =

$$= \frac{[\text{Wassermenge} \times \text{dessen Temperaturzunahme}] - [600 \times \text{Kondenswasser}]}{\text{Gasmenge}}.$$

So verfährt man meist. Da indessen die Menge des Kondenswassers aus 3 l Gas — für so viel beobachtet man oft — nur wenige Gramm beträgt, so ist die Messung sehr unzuverlässig. Es bleiben Tropfen im Kalorimeter hängen und das hat schon wesentlichen Einfluß. Man kann sich für die eigentliche Kalorimetrierung gut mit 3 l begnügen, muß aber die Kondenswassermessung auf mehr, etwa 15 l Gas ausdehnen und umrechnen.

198. **Schwierigkeiten bei Sauggas-, Kraft- und Gichtgasuntersuchung.** Um das unter Vakuum stehende Kraftgas einer Sauggasanlage zu kalorimetrieren, welches ja natürlich nicht freiwillig in den Brenner eintritt, kann man mittels eines aus zwei großen Flaschen (Säureballons) hergestellten Aspirators eine größere Menge ansaugen, und dann durch Umstellen der Flaschen den nötigen Druck erzeugen. Diese Methode hat noch den Vorteil, daß man bei langsamem und langem Ansaugen eine Mischung aus Gas der verschiedenen Zeiten erhält, die Kalorimetrierung ergibt gleich den durchschnittlichen Heizwert. Die Veränderung, die das Gas durch Absorption

einzelner Bestandteile im Aspiratorwasser erfährt, dürfte stets gering sein und verschwindet bei mehrfacher Benutzung des gleichen Wassers.

Die Firma Junkers & Co. liefert auch besondere Einrichtungen zur kontinuierlichen Unterdrucksetzung von Sauggas.

Wo die Spannung des zu untersuchenden Gases schwankt, wie das bei Kraftgasanlagen und bei Gichtgas der Fall ist, da muß man zur Kalorimetrierung und auch zur Messung die Spannung des verbrennenden Gases konstant halten. Sonst ist ein Beharrungszustand nicht zu erreichen. Junkers liefert zu dem Zweck einen Druckregler, in welchem ein Drosselventil unter dem Einfluß einer Schwimmerglocke steht, so daß auf konstante Spannung hinter dem Regler gedrosselt wird; die Höhe dieser Spannung ändert sich mit der Belastung der Schwimmerglocke.

199. **Fehlerquellen.** Die Physikalisch-Technische Reichsanstalt hat das Junkers-Kalorimeter geprüft, indem sie mit seiner Hilfe den Heizwert von Wasserstoff feststellte, der auch anderweit bekannt ist. Das Junkers-Kalorimeter ergab den Heizwert um 0,4% zu hoch. Mag auch bei den mit nur üblicher Sorgfalt angestellten Versuchen die Genauigkeit nicht ganz so groß sein, so ist sie jedenfalls für technische Zwecke ausreichend. Daß man aber auf dichte Verbindungen sieht, um Gasverluste zu vermeiden, daß man ferner eine richtig gehende Gasuhr verwenden muß, dies und ähnliches ist selbstverständlich. Die Gasuhr sei noch besonderer Aufmerksamkeit empfohlen. Außerdem erwähnen wir wiederholt, daß der Heizwert von dem reduzierten Gasvolumen abhängt: Druck und Temperatur sind also zu messen.

Man hört wohl anführen, ein Fehler entstehe dadurch, daß die Abgase gesättigt mit Feuchtigkeit aus dem Kalorimeter gehen, während die Verbrennungsluft nicht damit gesättigt war; daher werde die gemessene Menge Verbrennungswasser zu klein sein. Das letztere ist richtig, ein Fehler bei der Bestimmung des unteren Heizwertes tritt aber nicht auf. Der obere Heizwert wird um so viel (1—2%) zu niedrig gefunden, wie dem Mehrgehalt an Feuchtigkeit entspricht. Dieser Fehler gleicht sich wieder aus, weil man eben zu wenig Verbrennungswasser mißt. Sieht man also den unteren Heizwert als maßgebend an, so tritt kein Fehler auf.

Ein Fehler entsteht indes stets dadurch, daß das Gas beim Messen und beim Verbrennen mit Feuchtigkeit gesättigt ist. Daher hat man, wenn man 3 l an der Gasuhr ablas, zwar auch 3 l dem Brenner zugeführt, aber diese 3 l waren teils Wasserdampf und nur zum anderen Teil Leuchtgas. Bei 20° C hat der Wasserdampf eine Spannung von 17 mm Qu. Bei 760 mm Gesamtspannung des feuchten Gases würden also 2,2% des Gases aus Feuchtigkeit bestehen, und nur die verbleibenden 97,8% sind Gas und erzeugen wirklich Wärme. Der Heizwert des Gases selbst ist also größer als er erscheint.

Ob man durch eine Umrechnung den Heizwert auf trockenes Gas

bezieht, kommt auf den Zweck der Untersuchung an; auch im praktischen Betriebe hat ja das Gas die Gasuhr passiert und enthält Feuchtigkeit, und gelegentlich wird man das bei der Kalorimetrierung nachahmen wollen. Nur muß man dann dafür sorgen, daß das Gas beide Male den gleichen Feuchtigkeitsgehalt, also beide Male gleiche Temperatur hat, wenn es die Gasuhr passiert. Jedenfalls sieht man aber, daß Kalorimetrierungen verschiedene Ergebnisse haben werden, je nach der Temperatur, welche das Gas in der Gasuhr hatte. Die einfache Reduktion des Gasvolumens auf 0^0 und 760 mm, nach dem Gesetz von Mariotte-Gay-Lussac, schafft diese Unterschiede nicht fort. Dazu müßte man auf trockenes Gas von 0^0 und 760 mm reduzieren, und das ist stets das wissenschaftlich korrekte.

200. **Beispiel.** Eine Auswertung der Beobachtungsergebnisse lautet etwa wie folgt: Während durch die Gasuhr 10 l Gas gingen, wurden 4,96 kg Wasser aufgefangen (gewogen). Als Mittelwert aus minutlichen Ablesungen ergab sich die Eintrittstemperatur des Kühlwassers $15{,}17^0$ und die Austrittstemperatur $25{,}33^0$. Also sind $4{,}96 \cdot 10{,}16 = 57{,}5$ WE erzeugt worden. Diese Wärmemenge ist erzeugt worden von 10 l Gas, die aber bei ihrer Messung $17{,}5^0$ C hatten und unter 14 mm WS Überdruck standen. BStd 741 mm QuS, also hatte das Gas 742 mm Qu. absolute Spannung. Sein reduziertes Volumen war $10 \cdot \frac{273}{273 + 17{,}5} \cdot \frac{742}{760} = 9{,}51$ l. Daher hat das Gas einen oberen Heizwert von $\frac{57{,}5}{9{,}51} = 6{,}05 \frac{\text{WE}}{\text{ltr}} = 6050 \frac{\text{WE}}{\text{cbm}} = 6050 \frac{\text{gr cal}}{\text{ltr}}$.

Das Kondenswasser wurde länger aufgefangen, bis 30 l durch die Gasuhr gegangen waren, und dann wurden 29,6 gr gewogen. Aus dem Kubikmeter Gas entstanden also $\frac{29{,}6 \cdot 1000}{30} = 987$ gr $= 0{,}987$ kg, die bei ihrer Kondensierung $0{,}987 \cdot 600 = 592$ WE haben frei werden lassen. Unterer Heizwert $6050 - 592 = 5458 \frac{\text{WE}}{\text{cbm}}$.

201. **Flüssige Brennstoffe.** Für flüssige Brennstoffe hat man das Junkers-Kalorimeter nutzbar gemacht, indem man einen Brenner von besonderer Konstruktion, welche vollkommene Vergasung und rußfreie Verbrennung sichern soll, an einer Seite einer Wage aufhing. Man führt nun die Flamme ins Junkers-Kalorimeter ein, reguliert das Kalorimeter nach Bedarf und wartet den Beharrungszustand ab. Beim Verbrennen der Flüssigkeit wird die Seite der Wage, an welcher der Brenner hängt, leichter; hatte man den gefüllten Brenner nicht ganz austariert, so wird zu einem gewissen Zeitpunkt die Brennerseite die leichtere werden und der Wagebalken herüberschlagen. Wenn dabei die Zunge der Wage durch den Nullpunkt geht, beginnt man die Wassermessung sowie die Temperaturablesungen: Man entfernt nun eine bestimmte Anzahl von Grammen von der Wage: die Wage wird abermals durch den Nullpunkt gehen, sobald

die gleiche Anzahl von Grammen auf der Brennerseite verbrannt ist; in diesem Moment schließt man die Wassermessung ab.

Mit Hilfe der so ermittelten Brennstoffmenge berechnet man den Heizwert genau wie früher aus der Gasmenge. Auch die Messung des Kondenswassers und die Berechnung des unteren Heizwertes ist die gleiche.

XIV. Messung der Feuchtigkeit von Luft und Dampf.

202. **Luftfeuchtigkeit; Notwendigkeit, sie zu beachten.** Luft pflegt immer, sofern sie nicht etwa künstlich getrocknet wurde, feucht zu sein, d. h. sie pflegt Wasser in Dampfform zu enthalten. Die Bestimmung dieses Wassergehaltes heißt Hygrometrie.

Hygrometrische Methoden werden vielfach ausgeübt zu hygienischen Zwecken, insbesondere bei der Untersuchung von Lüftungsanlagen. Zu feuchte Luft wie auch zu trockene ist für das Wohlbefinden unerwünscht. Bei Maschinenuntersuchungen an Kompressoren, Gebläsen und dergleichen ist es nicht üblich, auf den Feuchtigkeitsgehalt zu achten. Diese Vernachlässigung ist nicht immer ohne Bedeutung. Die Eigenschaften feuchter Luft sind wesentlich andere als die von trockener. Da nämlich Wasserdampf nur etwa halb so schwer ist wie die Luft, so ist feuchte Luft leichter als trockene. Da die spezifische Wärme des Wasserdampfes etwa 0,5, die der Luft nur etwa 0,24 ist, so enthält feuchte Luft mehr Wärme als trockene,. wenn man auf gleiches Gewicht bezieht. Rechnet man nach Volumen, so heben sich die beiden Verschiedenheiten etwa auf, 1 cbm feuchte Luft hat die gleiche spezifische Wärme wie 1 cbm trockene.

Wir sahen nun schon bei der Bestimmung des spezifischen Gewichtes von Gasen an einem Beispiel, wie falsch die Meßresultate durch Vernachlässigen der Feuchtigkeit werden (§ 65) und empfahlen, im Zweifelsfall lieber mit mittelfeuchter Luft zu rechnen als mit trockener; ähnliches sahen wir im § 199, wo der Heizwert von Gasen von dem Feuchtigkeitsgehalt abhing. Ganz ebenso werden wir den Wirkungsgrad eines Ventilators falsch beurteilen, wenn wir nicht die Feuchtigkeit der Luft beachten; denn die von ihm erzeugte Leistung besteht zum wesentlichen darin, daß er der Luft eine Geschwindigkeit erteilt. Wir messen deshalb diese Geschwindigkeit w mit einem Anemometer, berechnen aus ihr und dem Rohrquerschnitt das geförderte Luftvolumen und bilden endlich das Produkt $\frac{1}{2} m w^2$, wo m die Luftmasse. Es ist klar, daß bei Ermittelung von m das spezifische Gewicht der geförderten Luft bekannt sein muß, und dieses hängt in hohem Grade von dem Feuchtigkeitsgehalt ab (§ 65). — Ein Hochofengebläse kann unter Umständen dem Sauerstoffbedarf des Ofens gerecht werden, wenn es die Luft trocken ansaugt, aber nicht mehr, wenn

die Feuchtigkeit einen großen Teil seines Zylinders beansprucht. Dieser Unterschied wird sich freilich in praxi kaum jemals bemerkbar machen.

Doch ist es hier nicht die Aufgabe, zu besprechen, wann eine Feuchtigkeitsmessung am Platze ist, sondern wie sie zu machen ist.

203. **Absolute und relative Feuchtigkeit.** Man mißt und gibt an entweder die absolute oder die relative Feuchtigkeit der Luft.

Die absolute Feuchtigkeit ist die in Kilogramm ausgedrückte Wassermenge in einem Kubikmeter Luft, und zwar ist hierunter das nicht reduzierte Luftvolumen verstanden. Man gibt also den Wassergehalt an in der Einheit $\frac{kg}{cbm}$. Diese Angabe ist unabhängig von der Temperatur, vorausgesetzt, daß sich nicht etwa mit der Temperaturänderung auch das Volumen ändert. Wenn wir dagegen durch Temperatur- oder Druckänderung das Volumen verändern, so ändert sich im umgekehrten Sinne der Feuchtigkeitsgehalt der Luft. Das ist so zu verstehen, daß zwar in der gleichen Luft die gleiche Feuchtigkeit bleibt, aber in einem Kubikmeter befindet sich beide Male verschieden viel.

Der Feuchtigkeitsgehalt kann nicht beliebig gesteigert werden, sondern nur so weit, daß der Partialdruck des Dampfes der herrschenden Temperatur so entspricht, wie die Dampftabellen angeben. So kann Luft von 20^0 nicht mehr als 0,0172 $\frac{kg}{cbm}$ Wasserdampf enthalten, dieser Dampf übt dann eine Spannung von 17,4 mm Qu. aus. Welchen Druck die Luft dabei hat ist gleichgültig, diese Zahlen gelten also ebenso im Kondensator einer Dampfmaschine, wo die gesamte absolute Spannung gering ist, wie auch in der Atmosphäre; der Partialdruck der Luft macht die Differenz zwischen der gesamten Spannung und jener des Dampfes aus.

Wenn Luft so viel Dampf enthält, wie bei der betreffenden Temperatur möglich ist, wobei dann auch der Dampf den Partialdruck hat, welcher der betreffenden Temperatur entspricht, so sagt man von der Luft, sie sei mit Feuchtigkeit gesättigt oder auch, ihr relativer Feuchtigkeitsgehalt betrage 100 %. Mehr kann sie nicht enthalten; wenn sie aber weniger Feuchtigkeit enthält, so sagt man beispielsweise, ihr relativer Feuchtigkeitsgehalt betrage 50 %, dann enthält sie nämlich halb so viel Feuchtigkeit wie sie bei der betreffenden Temperatur enthalten kann, und entsprechend in anderen Fällen. Die relative Feuchtigkeit gibt also an, in welchem Verhältnis die Luft weniger Dampf enthält als sie, ihrer Temperatur nach, enthalten könnte. Die relative Feuchtigkeit heißt auch Sättigungsgrad. — Diese Definition ist übrigens noch zweideutig: man kann Luft von 50 % Feuchtigkeit entweder so definieren, daß sie dem Gewicht nach halb so viel Wasser enthält wie Luft von 100 %, oder aber, daß in ihr der Partialdruck des Wasserdampfes halb so groß sei wie in Luft von 100 %. Praktisch decken sich diese Definitionen, und man kann sagen,

daß Luft von 20° bei 50 % relativer Feuchtigkeit einen absoluten Feuchtigkeitsgehalt von $\frac{1}{2} \cdot 0{,}0172 = 0{,}0086 \frac{\text{kg}}{\text{cbm}}$ hat, und daß in ihr der Wasserdampf einen Partialdruck $\frac{1}{2} \cdot 17{,}4 = 8{,}7$ mm Qu. ausübt. Hiervon machten wir schon in dem Beispiel § 65 Gebrauch.

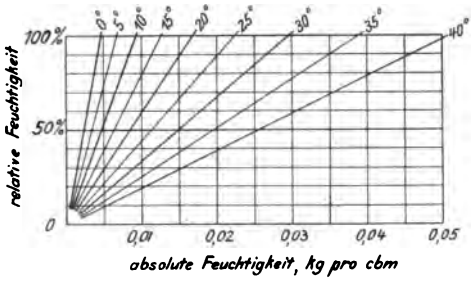


Fig. 176.

Wie man mit Hilfe der Dampftabellen relativen Feuchtigkeitsgehalt in absoluten umrechnet und umgekehrt, wird hiernach klar sein. Man kann dazu auch graphische Darstellungen nach Fig. 176 benutzen, welche die Dampftabellen wiedergeben.

204. **Bestimmung der absoluten Feuchtigkeit.** Man kann den absoluten Feuchtigkeitsgehalt von Luft bestimmen, indem man die Luft durch ein Chlorkalziumrohr saugt; die Gewichtszunahme des Chlorkalziumrohres gibt den Wassergehalt. Viel weniger einfach ist aber die Bestimmung des angesaugten Luftvolumens. Man muß dafür sorgen, daß man die durchgesaugte Luftmenge messen kann, indem man sie unter einer kalibrierten Glocke auffängt, indem man sie durch eine Gasuhr gehen läßt, oder indem man die Wassermenge mißt, welche die Luft in dem saugenden Aspirator verdrängt. Doch hat man zu beachten, daß diese Luft im messenden Aspirator wieder mit Feuchtigkeit gesättigt wird und daher ein größeres Volumen einnimmt als zuvor, wo sie nicht gesättigt war. Die genaue Berechnung des Volumens, das die halbfeuchte Luft vor dem Passieren des Chlorkalziumrohres hatte, ist sehr umständlich, durch Vernachlässigungen können aber Fehler von 1—2 % leicht vorkommen. Diese Methode ist keine technische.

Bequemer ist die Taupunktsmethode. Ein Metallgefäß, dessen Vorderwand ein Silber- oder Nickelspiegel *S* bildet, Fig. 177, wird innen mit Äther gefüllt und mit Hilfe eines Gummigebläses Luft hindurchgesaugt. Durch Verdunsten des Äthers sinkt die Temperatur, wie man an einem Thermometer beobachten kann, und damit wird auch die umgebende Luft abgekühlt; schließlich ist sie nicht mehr imstande, die Feuchtigkeit bei der geringeren Temperatur zu behalten, das tritt ein bei der Temperatur, wo sie gerade gesättigt ist, ihrem Taupunkt: auf dem Spiegel bildet sich ein Niederschlag. Sobald er dadurch getrübt wird, liest man die Temperatur ab, und schließt nach den Dampftabellen auf den Wassergehalt der Luft.

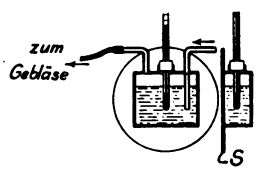


Fig. 177. Taupunktsspiegel.

Die Berechnung des Ergebnisses wird nun oft falsch vorgenommen. Falsch ist es nämlich, die zur Taupunktstemperatur gehörige Sättigungsdampfmenge den Dampftabellen zu entnehmen und nun zu schließen: diese Menge sei in einem Kubikmeter der untersuchten Luft gewesen. Man vergißt dabei, daß beim Abkühlen in der Nähe des Taupunktsspiegels auch die Luft an Volumen abnahm; es ist wohl klar, daß Luft, wenn man sie abkühlt, nachher in jedem Kubikmeter mehr Feuchtigkeit enthält als vorher: Das gleiche Dampfgewicht kommt nach der Abkühlung auf einen kleineren Raum. Der Fehler bei dieser Rechnungsweise kann 5 % und mehr betragen.

Richtig hingegen ist es, den zu der Taupunktstemperatur gehörigen Sättigungsdruck des Dampfes den Dampftabellen zu entnehmen und zu schließen: dieser Druck sei der Dampfdruck auch in der untersuchten Luft gewesen; da er einen gewissen Prozentsatz des möglichen ausmachte, so ist dieser Prozentsatz auch der relative Feuchtigkeitsgehalt der Luft gewesen.

Ein Beispiel wird das klar machen. Luft von 25° habe den Taupunkt 10° gehabt. Zu 10° gehört der Sättigungsdruck 9,17 mm Qu., der Dampfdruck in der untersuchten Luft ist also 9,17 mm Qu., während nach den Dampftabellen ein Dampfdruck von 23,55 mm Qu. bei 25° möglich gewesen wäre. Also ist $\frac{9{,}17}{23{,}55} \cdot 100 = 39{,}0\,\%$ der Sättigungsgrad der untersuchten Luft; sie enthielt also $0{,}39 \cdot 0{,}0225 = 0{,}00877$ kg Dampf im Kubikmeter. — Nach der oben als falsch bezeichneten Rechnungsweise hätte man den Dampftabellen die Sättigungsmengen 0,00913 $\frac{\text{kg}}{\text{cbm}}$ bei 10° und 0,02253 $\frac{\text{kg}}{\text{cbm}}$ bei 25° entnommen und den falschen Wert $\frac{0{,}00913}{0{,}02253} \cdot 100 = 40{,}5\,\%$ erhalten; Dampfgehalt danach $0{,}405 \cdot 0{,}0225 = 0{,}00911$ $\frac{\text{kg}}{\text{cbm}}$, d. h. um 2,5 % falsch.

205. **Bestimmung der relativen Feuchtigkeit.** Die Messung der relativen Feuchtigkeit ist mit Hilfe des Hygrometers sehr bequem auszuführen, wenngleich nicht gerade sehr genau. Ein mit Äther entfettetes Frauenhaar verändert seine Länge mit wechselnder Feuchtigkeit, und zwar ist die Länge von der relativen Feuchtigkeit abhängig. Befestigt man ein Ende des Haares am Gestell des Instrumentes, das andere Ende an einem Zeiger, nötigenfalls unter Zwischenschaltung einer vergrößernden Übersetzung, so kann man die Skala hinter dem Zeiger in Prozente relativer Feuchtigkeit einteilen. Überaus genau sind, wie erwähnt, die Haarhygrometer nicht. Insbesondere ist ihre Angabe nicht ganz von der Temperatur unabhängig. Doch sollen sie bis zu Temperaturen von 200° brauchbar bleiben, wenn man nur nach solcher Überanstrengung jedesmal das Haar einige Stunden feucht hält, und eventuell neu justiert.

Eine rein empirische Messung der Feuchtigkeit bewirkt das Psychrometer. Dasselbe besteht aus zwei Thermometern, deren eines eine Umwicklung aus Gaze um die Kugel herum hat. Diese wird feucht gehalten; das feuchte Thermometer zeigt, der Verdunstungskälte wegen, weniger an als das trockene. Aus der „psychometrischen Differenz" kann man nach Tabellen, die jedem Instrument beigefügt werden, auf die Feuchtigkeit der umgebenden Luft schließen, denn bei trockener Luft wird Verdunstung und Verdunstungskälte mehr ausmachen als bei feuchter. Der Zusammenhang zwischen Feuchtigkeitsgrad und psychrometrischer Differenz hängt aber auch von der Luftbewegung ab. Um diese stets gleichmäßig zu gestalten, fügt man beim Aspirationspsychrometer den beiden Thermometern noch einen kleinen Ventilator hinzu, der die Luft an ihnen vorbeitreibt. — Psychrometertabellen sind umfangreich, wenn sie alle Verhältnisse umfassen sollen. Man findet eine in Wolpert, Lüftung und Heizung, 1898, Bd. II, S. 249 oder man benutze die Psychrometertafeln von Jelinek (ein Buch).

Für das Psychrometer spricht der Umstand, daß es in der Meteorologie fast allgemein gebraucht wird. Für maschinentechnische Zwecke — wir deuteten solche oben an — hat die Feuchtigkeitsbestimmung den Zweck, eine Korrektion anzubringen, und dafür sind die Hygrometer durchaus ausreichend. Man prüft sie, indem man sie zusammen mit einem feuchten Leinenlappen längere Zeit unter einer Glasglocke läßt, sie müssen dann 100 % anzeigen.

Eine richtige Eichung des Hygro- oder Psychrometers hätte etwa zu geschehen, indem man einen Luftstrom am Instrument vorbeiführt, seine Menge mißt und dann seine Feuchtigkeit durch Absorbieren in Chlorkalzium bestimmt.

Habe man 55 % relative Feuchtigkeit bei 25° C ermittelt, so ist der absolute Feuchtigkeitsgehalt $0{,}55 \cdot 0{,}0225 = 0{,}0124 \frac{\text{kg}}{\text{cbm}}$, — weil nämlich 0,0225 nach den Dampftabellen die Sättigungsmenge bei 25° ist.

206. **Dampffeuchtigkeit; spezifischer Dampfgehalt.** Der von Dampfkesseln erzeugte Dampf pflegt — sofern er nicht überhitzt wird — wasserhaltig zu sein: er reißt beim Austreten aus der Wasseroberfläche Wassertröpfchen mit, die dann suspendiert bleiben; außerdem bildet sich Wasser im Dampf, sobald er bei der Fortleitung Wärme verliert. Man pflegt nun auch solchen feuchten, das heißt mit Wassertröpfchen untermischten Dampf einfach nach Gewicht anzugeben, dergestalt, daß man das Gesamtgewicht aus Dampf plus mitgerissenem Wasser als das Gewicht des feuchten Dampfes bezeichnet. Dieser Brauch rührt daher, daß man ja den Dampf meist in kondensierter Form mißt (§ 103), wo man dann natürlich nicht mehr sehen kann, was vorher Dampf gewesen ist, was Feuchtigkeit. Daher kann 1 kg Dampf beispielsweise bestehen aus 0,95 kg wirklichem Dampf, während die übrigen 0,05 kg in flüssiger Form sind. Von solchem Dampf

heißt es dann, er enthalte 5 % Wasser, oder er enthalte 95 % Dampf, oder endlich wissenschaftlich, sein spezifischer Dampfgehalt sei 0,95. Es ist üblich, den spezifischen Dampfgehalt mit x zu bezeichnen.

Da in wirklichem Dampf etwa sechsmal so viel Wärme steckt wie in dem gleichen Gewicht mitgerissenen Wassers, so ist feuchter Dampf minderwertig gegenüber trockenem. Auch betriebstechnisch ist er unbequem. Also ist es wünschenswert, die Qualität des Dampfes, d. h. seinen Feuchtigkeitsgehalt festzustellen.

207. **Drosselkalorimeter.** Die Messung des Feuchtigkeitsgehaltes geschieht fast allgemein mit Hilfe des Drosselkalorimeters. Dieses besteht (Fig. 178) aus einem einfachen Hohlraum, dessen Wände gegen Wärmeausstrahlung durch Isolation geschützt sind; die Isolation ist nicht gezeichnet. In ihn tritt der Dampf, dessen Spannung p_1 oder Temperatur t_1 man festgestellt hat (beide hängen ja voneinander ab) durch ein Ventil A ein; in diesem wird er auf eine geringe Spannung gedrosselt. Beim Drosseln von Dampf wird Wärme frei, denn gesättigter Dampf von geringer Spannung enthält weniger latente Wärme als ebensolcher von hoher Spannung. Die frei gewordene Wärme wird Überhitzung des Dampfes bewirken, aber erst nachdem sie den Dampf getrocknet hat. Je feuchter also der Dampf war, desto weniger wird er beim Drosseln überhitzt. Messen wir die Dampfspannung und die Dampftemperatur im Kalorimeter, bei p_2 und t_2, so können wir aus der Überhitzung auf die frühere Feuchtigkeit schließen. Der Dampf fließt unten ins Freie. Bei der Messung muß der Apparat im Beharrungszustand sein.

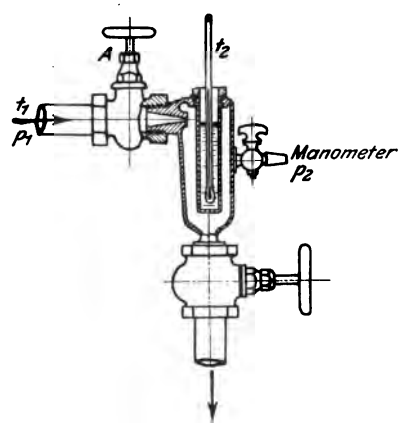


Fig. 178. Drosselkalorimeter.

Besteht ein Kilogramm feuchten Dampfes aus x kg Dampf und $(1 - x)$ kg Wasser, und bezeichnet q_1 die Flüssigkeitswärme von 1 kg Wasser, λ_1 die Gesamtwärme von 1 kg Dampf, beide bei der Anfangsspannung p_1 beziehungsweise der entsprechenden Temperatur t_1, so ist also in den x kg Dampf die Wärmemenge $x \cdot \lambda_1$, und in den $(1 - x)$ kg Wasser die Wärmemenge $(1 - x) \cdot q_1$ enthalten; vor dem Drosseln war also in dem Kilogramm feuchten Dampfes die Wärmemenge

$$x \cdot \lambda_1 + (1 - x)\, q_1$$

vorhanden. Bezeichnet weiterhin λ_2 die Gesamtwärme von 1 kg gesättigtem Dampf bei der Spannung p_2 im Drosselkalorimeter, bezeichnet Δt die Anzahl

von Graden, um welche Überhitzung eingetreten ist, und c die spezifische Wärme des Dampfes bei der Überhitzung, so ist der Wärmeinhalt von 1 kg Dampf, wie er im Kalorimeter vorliegt,

$$\lambda_2 + c_p \cdot \Delta t .$$

Da Wärme nicht zu- oder abgeführt ist, wegen der guten Isolierung des Ganzen, so muß sein

$$x \cdot \lambda_1 + (1 - x)\, q_1 = \lambda_2 + c_p \cdot \Delta t ,$$

woraus folgt:

$$x = \frac{\lambda_2 + c_p \cdot \Delta t - q_1}{\lambda_1 - q_1} .$$

Sämtliche Größen hierin lassen sich den Dampftabellen entnehmen, wie ein Beispiel zeigen wird. c_p pflegt man zu 0,48 anzunehmen.

Dampf von 10,71 at Überdruck sei kalorimetriert worden, und man habe im Drosselkalorimeter bei einem Überdruck von 35 cm Qu. = 0,476 at eine Temperatur von 136,2° C abgelesen. Barometerstand 74,0 cm Qu. = 1,01 at. — Bei Dampf von 10,71 + 1,01 = 11,72 at absolutem Druck entnehmen wir den Dampftabellen; $\lambda_1 = 663{,}2$; $q_1 = 188{,}6$. Bei dem gedrosselten Dampf von 0,476 + 1,01 = 1,49 at absolutem Druck ist $\lambda_2 = 640{,}2$ und die Sättigungstemperatur 110,6° C. Die Überhitzung ist also $\Delta t = 136{,}2 - 110{,}6 = 25{,}6°$. Damit wird $x = 0{,}978$; der Dampf enthielt rund 2 % Feuchtigkeit.

Da die äußere Form des Drosselkalorimeters unwesentlich ist, so kann man sich eins aus Gasrohrenden leicht selbst zurechtbauen. Man achte auf gute Einhüllung. Das Ventil A der Fig. 178 soll stets ganz geöffnet sein, zum Drosseln genügt die Düse. Je größer nämlich die arbeitende Dampfmenge, desto weniger Einfluß haben die Strahlungsverluste.

Der wunde Punkt am Drosselkalorimeter ist unsere mangelhafte Kenntnis der spezifischen Wärme des überhitzten Dampfes. Wir nannten oben den gebräuchlichen Wert $c_p = 0{,}48$, nach Regnault. Neuere Werte dafür findet man in Z. V. D. I. 1903, 1880; 1904, 24, 698, 1189; danach ist c_p stark veränderlich mit wechselnder Spannung.

208. **Abscheidekalorimeter.** Man erkennt leicht, oder kann sich durch Nachrechnen davon überzeugen, daß das Drosselkalorimeter nur für mäßige Feuchtigkeitsgrade, 2 bis 4 %, brauchbar ist. Sehr feuchter Dampf wird zwar im Kalorimeter etwas getrocknet, aber doch nicht ganz oder gar überhitzt. Da indes vor jeder Maschine ein Wasserabscheider in die Dampfleitung eingeschaltet ist, so pflegt der zu untersuchende Dampf auch nicht sehr feucht zu sein. Will man jedoch untersuchen, wie feucht der von einem Kessel erzeugte Dampf ist, so reicht gelegentlich das Drosselkalorimeter nicht aus — man erkennt das daran, daß man am Kalorimeter die Sättigungstemperatur des Dampfes abliest und muß dann alle Schlüsse unterlassen!

Für solche Fälle kann gelegentlich das Abscheidekalorimeter von Carpenter dienen, welches Fig. 179 darstellt. In ihm wird der Dampf mechanisch von Feuchtigkeit befreit und diese gemessen. Der Dampf tritt oben ins Instrument ein, muß innerhalb des aus dünnem Messingblech gestanzten Korbes seine Richtung plötzlich ändern, durch einen schmalen Spalt zwischen dem Korb und dem Deckel des Instruments hindurch gehen und entweicht endlich durch eine Düse. Die Menge des entweichenden Dampfes mißt man mittels des Manometers M, indem nämlich die Düse als Ausflußöffnung geeicht ist; man hat durch Kondensieren ein für allemal festgestellt, wieviel Dampf bei verschiedenen Spannungen sekundlich durch die Düse geht. Nun wurde aber das im Dampf ent-

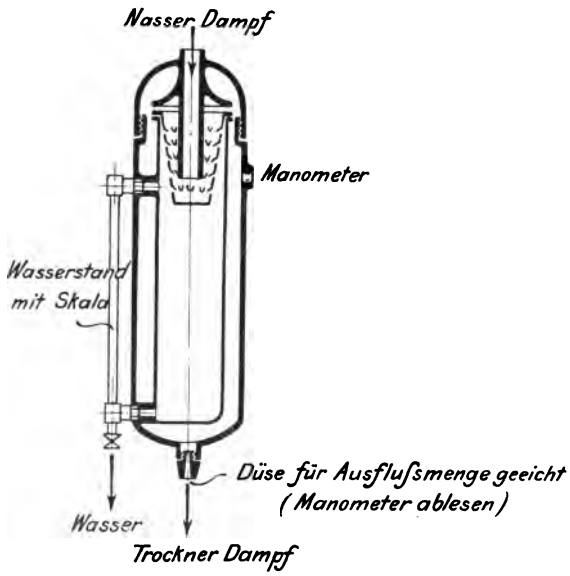


Fig. 179. Abscheidekalorimeter.

haltene Wasser bei der Richtungsänderung an die Korbwände geschleudert und fällt hinab in den inneren Raum. Am Wasserstandsglas mißt man, wieviel Wasser in einer gewissen Zeit abgeschieden wurde. Ist nun D das sekundliche Gewicht des trockenen Dampfes und W das gleiche vom Wasser, so ging $W + D$ sekundlich an feuchtem Dampf in den Apparat; der spezifische Dampfgehalt ist $x = \frac{D}{W + D}$.

Zwar wird behauptet, daß das Abscheidekalorimeter den Dampf sehr sicher trockene; immerhin wird man gut tun, noch ein Drosselkalorimeter dahinter zu schalten. Diese beiden Instrumente ergänzen sich ja trefflich: Das Drosselkalorimeter kann nur mäßig feuchten Dampf verarbeiten, trocknet

ihn aber ganz sicher; das Abscheidekalorimeter verarbeitet beliebig nassen Dampf, trocknet ihn aber nicht so sicher. — Daß man den Dampf bei dieser Kombination nicht mehr mit Hilfe einer Ausströmdüse messen kann, ist klar. Man muß ihn etwa zum Schluß kondensieren.

209. **Andere Methoden.** Andere Methoden zu gleichem Zweck beruhen etwa darauf, daß man den nassen Dampf mittels elektrischer Widerstände so viel Wärme zuführt, daß er eben überhitzt wird, und die erforderliche Energiezufuhr elektrisch mißt. Es ist $1\ \mathrm{KW} = 866\ \frac{\mathrm{WE}}{\mathrm{Stde}}$. Man kann auch die Wärmezufuhr durch Dampf von höherer Spannung bewirken, der sie durch Kupferspiralen überträgt. Man kann auch den Dampf kondensieren und dabei kalorimetrisch seinen Wärmeinhalt feststellen. Und noch manche andere Methode ist vorgeschlagen. Für jede Methode aber gilt das Folgende.

210. **Probenahme; Unsicherheit dabei.** Man ist nur selten in der Lage, den Dampf als Ganzes einer Feuchtigkeitsuntersuchung zu unterwerfen. Man leitet vielmehr einen kleinen Zweigstrom in das Kalorimeter und prüft diesen. Da gilt nun, was wir über die Entnahme von Kohleproben für Heizwertbestimmungen sagten: Das Kalorimeter kann im besten Fall die Probe richtig untersuchen; stellt diese Probe keinen Durchschnittswert des Dampfes dar, so liegt die Schuld für ein falsches Resultat nicht im Kalorimeter, sondern in der Art der Probenahme.

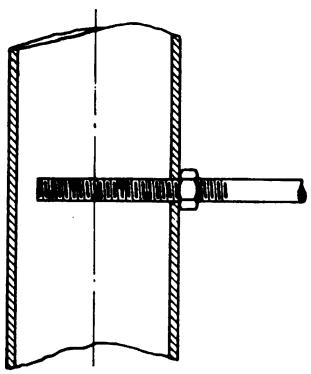


Fig. 180.

Man entnimmt die Probe nach Fig. 180: Das Entnahmeröhrchen wird noch quer durch das Dampfrohr hindurchgeführt und ist mit Löchern versehen; es ist am Ende zu oder offen. Man hofft so, wenn der Dampf im Rohr nach konzentrischen Schichten gleichmäßig verteilt ist, von jeder Schicht gleich viel zu bekommen. Da in wagerechten Rohren Wasser am Boden entlang läuft, so soll man den Entnahmestutzen in ein senkrechtes Rohr legen, in dem überdies noch der Dampf aufwärts gehen soll. Außerdem muß man das Röhrchen bis zum Kalorimeter hin gut verpacken, sonst verliert der Dampf noch Wärme.

Aber trotz dieser Vorsichtsmaßregeln dürfte die Probe selten den Durchschnitt darstellen. Das schwerere Wasser wird im allgemeinen mehr als der Dampf das Bestreben haben, geradeaus zu gehen, und es wird zu trockener Dampf in das Kalorimeter kommen. Jede Untersuchung der Dampfgüte ist daher von zweifelhaftem Wert: in der Tat werden bei uns solche Bestimmungen selten gemacht, während sie in Nordamerika recht gebräuchlich sind.

Welche Art von Kalorimeter man verwendet, ist hierfür gleichgültig. Das Drosselkalorimeter ist das bequemste und ist an sich durchaus einwandsfrei. Ebenso einwandsfrei ist die angeführte Kombination aus Abscheide- und Drosselkalorimeter.

In den seltenen Fällen, wo man den ganzen Dampf untersuchen kann, fallen diese Einwände fort. Das ist z. B. der Fall, wenn man die Spannung (in Heizanlagen) durch ein Druckminderventil reduzieren kann, solches ist dann direkt als Drosselkalorimeter zu benutzen.

XV. Gasanalyse.

211. **Aufgabe und Zweck.** Aufgabe der maschinentechnischen Gasanalyse ist entweder die Untersuchung von Rauchgasen, den Verbrennungsprodukten einer Feuerungsanlage oder eines Verbrennungsmotors, auf ihren Gehalt an Kohlensäure CO_2, Kohlenoxyd CO und Sauerstoff O; oder die Untersuchung von Nutzgasen, welche meist zum Betrieb von Gasmaschinen (Kraftgas), gelegentlich zum Feuern dienen sollen, auf Wasserstoff H, Kohlenoxyd CO, Methan CH_4, schwere Kohlenwasserstoffe und die in diesem Fall unerwünschten Beimengungen von CO_2 und O.

Zweck der Gasanalyse ist die Kontrolle der Verbrennung oder Gaserzeugung, eventuell die Feststellung der durch die Essengase bewirkten Verluste.

Wir beschränken uns hier im allgemeinen auf die Untersuchung der Verbrennungsgase; die von Kraftgasen wird viel seltener vorgenommen, ist viel schwieriger und erfordert Kenntnisse, die sich auf dem uns zu Gebote stehenden Raum nicht wiedergeben lassen. Ein kurzer Abriß wird in § 222 gegeben, im übrigen verweisen wir auf Winklers Technische Gasanalyse.

212. **Rauchgasanalyse; Verfahren im Prinzip.** Das Verfahren bei der Analyse der Rauchgase oder der Abgase einer Gasmaschine ist das folgende: Man sperrt ein bestimmtes Volumen der Rauchgase ab — häufig sind es 100 ccm. Diese Gasmenge bringt man nun mit einem Absorptionsmittel für Kohlensäure, meist mit Kalilauge, in Berührung, und stellt dann fest, um wieviel sich die Gasmenge verringert hat: der Minderbetrag war CO_2. Die verbleibende Gasmenge bringt man nun mit einem Absorptionsmittel für Sauerstoff in Berührung, meist mit Pyrogallussäure, und mißt dann wieder den Volumenverlust: dieser zweite Volumenverlust war O. Häufig begnügt man sich mit diesen beiden Feststellungen, und sieht den Rest dann einfach als Stickstoff an. Sonst aber bringt man das noch verbliebene Gas mit Kupferchlorürlösung in Berührung, der Volumenverlust hierbei ist Kohlenoxyd — und man betrachtet den Rest als Stickstoff. Kohlenoxyd ist meist wenig oder gar nicht vorhanden.

Bei allen Volumenmessungen muß das Gas unter derselben Spannung stehen und dieselbe Temperatur haben — welche, ist gleichgültig, da es nur auf dem prozentualen Gehalt ankommt und da alle Gase gleich stark durch Temperatur und Spannung beeinflußt werden. Die abgelesenen Kubikcentimeter sind zugleich Prozente des ursprünglichen Gasvolumens, wenn man 100 ccm abgesperrt hatte.

213. **Orsat-Apparat.** Um das Gas bequem messen und die Berührung mit den Absorptionsmitteln bequem veranlassen zu können, hat man eine große Reihe von Apparaten erdacht. Der Orsat-Apparat ist darunter der einzige, welcher in der Maschinentechnik Eingang gefunden hat; wir besprechen nur ihn, und verweisen wegen anderer Apparate wieder auf Winklers Technische Gasanalyse.

Den Orsat-Apparat zeigt Fig. 181. M ist das nach Kubikcentimetern graduierte Meßgefäß, $A\,B\,C$ sind die Absorptionsgefäße, gefüllt mit Kalilauge, Pyrogallussäure und Kupferchlorürlösung. Sie sind durch Hähne a, b, c absperrbar; treibt man das Gas in eines von ihnen hinüber, so entweicht die Flüssigkeit in kommunizierende Gefäße $A_1\,B_1\,C_1$, deren eines der Querschnitt erkennen läßt. Gummibeutel auf $A_1\,B_1\,C_1$ verhüten, daß sich z. B. die Pyrogallussäure von der Außenluft aus mit Sauerstoff sättige. Glasröhrenbündel in $A\,B\,C$ bleiben beim Zurücktreten der Flüssigkeit benetzt und erzielen eine große absorbierende Oberfläche. Die Niveauflasche N, mit dem Meßgefäß M durch Gummischlauch verbunden, kann man heben und senken: bei tiefer Stellung der Niveauflasche saugt das darin befindliche Wasser Gas ins Meßgefäß hinein; steht die Niveauflasche hoch, so wird das Gas aus dem Meßgefäß in dasjenige der Absorptionsgefäße gedrückt, dessen Hahn offen ist. Man kann also durch Senken und Heben der Niveauflasche zunächst Gas in den Apparat hineinsaugen und dieses dann abwechselnd in Berührung mit den Reagentien und zur Messung bringen. Die Verbindungsrohre zwischen den Gefäßen sind kapillar und können vernachlässigt werden.

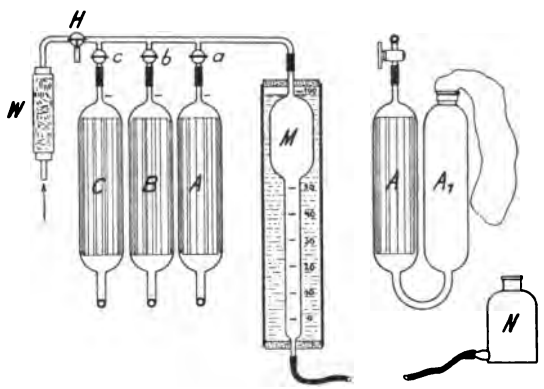


Fig. 181. Orsat-Apparat.

Das erste Ansaugen geschieht bei passender Stellung des Dreiweghahns H. Da die Bleileitung, welche von der Entnahmestelle zum Apparat

führt, zunächst voll Luft ist, so entläßt man einige angesaugte Füllungen des Meßzylinders ins Freie — dazu der Dreiweghahn — bis man eine benutzt. Zum Reinigen der angesaugten Gase von Ruß und Staub ist Watte im Rohr W. — Für gleiche Temperatur bei allen Messungen sorgt ein Wassermantel um den Meßzylinder; gleiche Spannung bei allen Messungen hat man, wenn man bei der Ablesung die Niveauflasche so hält, daß ihr Wasserspiegel mit dem im Meßgefäß gleich hoch steht.

Es gibt auch Orsat-Apparate mit nur zwei Absorptionsgefäßen, dann wird CO nicht bestimmt.

214. **Handhabung.** Nach dieser Beschreibung wird folgende Anweisung für die Handhabung des Apparates verständlich sein.

Zunächst ist der Apparat in Ordnung zu bringen. ABC müssen ganz voll Reagens sein. Ein nur halbgefülltes verbindet man mit M und saugt das Reagens bis zu einer Marke an (Niveauflasche tief). Ferner muß M ganz voll Wasser sein: man drückt die Luft durch H ins Freie (Niveauflasche hoch). Die engen Verbindungsrohre bleiben voll Luft.

Weiterhin: N senken, H so öffnen, daß Rauchgas angesaugt wird („Saugstellung"), dann N heben und gleichzeitig H in „Druckstellung", so daß Angesaugtes ins Freie gedrückt wird. N wieder senken, zugleich H in Saugstellung, und so fort, bis Leitung luftfrei. (Man achte darauf, daß niemals H die Leitung mit der Außenluft verbindet, sonst tritt immer neue Luft in diese, die ja meist unter der Saugspannung des Fuchses steht.) Schließlich definitive Probe nehmen, indem M von oberer Marke bis Null mit Gas gefüllt wird. Zuleitung mit Quetschhahn schließen, H schließen. Ablesung Null muß sein, wenn Spiegel in M und N gleich ist; kleinen Überschuß eventuell durch H ins Freie drücken. N heben, a öffnen, Gas tritt nach A; wieder zurücksaugen, wieder nach A drücken, und so mehrfach „durchspülen", dabei stets aufsteigende Flüssigkeitssäule ansehen, damit sie nicht zu hoch steigt und übertritt. Schließlich Reagens in A zur Marke ansaugen, M ablesen, wobei Spiegel in M und N gleich hoch ist. Dann mit B verfahren, wie eben mit A.

Da CO_2 sehr schnell, O etwas träger, CO sehr träge absorbiert wird, so hat man entsprechend verschieden oft durchzuspülen, etwa fünfmal für CO_2, zehnmal für O und zwölfmal für CO. Die Feststellung der Gase hat in der Reihenfolge CO_2, O, CO zu geschehen, denn CO_2 wird in allen drei Reagentien absorbiert, von der Kalilauge indessen wird nur CO_2 absorbiert.

Ist es durch Unachtsamkeit passiert, daß ein Reagens ins Meßgefäß übergetreten ist, so wird man übersehen können, daß dadurch die eben im Gange befindliche Analyse nicht gefälscht wird, man kann sie ruhig beenden. Vor der nächsten aber muß man den Apparat reinigen und das Wasser in Meßgefäß und Niveauflasche erneuern.

Hierbei kommt es leicht vor, daß das neueingefüllte Wasser andere Temperatur hat als das im Wassermantel des Meßgefäßes befindliche.

Das ist unzulässig. Durch Wärmeaustausch ändert sich dann die Temperatur des Wassermantels von einer Gasablesung zur anderen und damit die des Gases bei der Messung; 3° Temperaturunterschied macht mehr als 1 % Volumunterschied aus! Der Apparat muß ganz auf Zimmertemperatur sein, wenn man damit arbeitet. Muß man neues Wasser einfüllen, so temperiere man es.

Die Lösungen zum Füllen des Apparates kann man aus Apparatehandlungen fertig beziehen. Doch sei auch noch die Anweisung zur Herstellung gegeben:

1. Kalilauge, wässerig, spezifisches Gewicht ca. 1,27.

2. Pyrogallussäure: 15 gr Pyrogallussäure, gelöst in 40 ccm heißem Wasser, dann 70 ccm Kalilauge, spezifisches Gewicht 1,20 bis 1,28, hinzugeben.

3. Kupferchlorürlösung: 86 gr Kupferasche mit 17 gr Kupferpulver (aus Kupferoxyd mit Wasserstoff reduziert) unter Schütteln in 1086 gr Salzsäure, spezifisches Gewicht 1,124, einstreuen. In der Lösung müssen einige Kupferstücke aufbewahrt werden.

Eine Füllung des Orsatapparates reicht zu einer großen Anzahl von Analysen, man sagt zu 300.

215. **Luftüberschußkoeffizient.** Die wichtigte Anwendung der Rauchgasanalyse ist die Berechnung des Luftüberschusses. Wenn die Verbrennung genau mit der erforderlichen Luftmenge durchgeführt wäre, so enthielten die Rauchgase keinen Sauerstoff. Ein Gehalt an Sauerstoff deutet also auf überschüssige Luft. Den Luftüberschußkoeffizienten $l = \frac{\text{verwendete Luft}}{\text{notwendige Luft}}$ findet man aus folgender Betrachtung.

Zu dem vorhandenen Sauerstoffgehalt der Rauchgase, welcher den überschüssigen Sauerstoff darstellt und den wir mit O bezeichnen wollen, gehört eine Stickstoffmenge $\frac{79}{21} O$, weil beide Gase im Verhältnis 79:21 in der Luft gemischt sind. $\frac{79}{21} O$ ist also der überflüssigerweise vorhandene Stickstoff. Außerdem kennen wir den insgesamt vorhandenen Stickstoff, er war der Restbetrag der Analyse, den wir N nennen. Der nach der Zusammensetzung der Luft notwendige Stickstoff ist also $N - \frac{79}{21} O$, der praktisch verwendete ist N, also ist $l = \frac{N}{N - \frac{79}{21} O}$, denn für das Verhältnis der Luftmengen können wir auch das Verhältnis der Stickstoffmengen setzen. Außerdem können wir unter N und O, da es ja nur auf den verhältnismäßigen Anteil beider ankommt, die Prozentsätze der betreffenden Gase im Rauchgas verstehen.

Diese Berechnungsweise für l ist allgemein üblich; richtig ist sie nur, wenn kein Kohlenoxyd in den Rauchgasen vorhanden ist. Ist solches aber vorhanden, so ist es offenbar korrekt, zu bedenken, daß bei vollkommener Verbrennung noch ein Teil des jetzt übrig gebliebenen Sauerstoffes verbraucht worden wäre. Dieser Teil war also nicht überschüssig. Da 1 Raumteil Kohlenoxyd zur Verbrennung $\frac{1}{2}$ Raumteil Sauerstoff erfordert, so haben wir die gemessene Sauerstoffmenge O um die halbe Menge des gemessenen Kohlenoxydes $\frac{1}{2}\,CO$ zu vermindern, und erhalten den Luftüberschußkoeffizienten $l = \dfrac{N}{N - \frac{79}{21}\left(O - \frac{CO}{2}\right)}$.

Die bisweilen zu findende Formel $l = \dfrac{21}{21 - O}$, worin O wieder der Sauerstoffgehalt, ist nur annähernd richtig, sobald das Brennmaterial Wasserstoff enthielt, und falsch, wenn es viel Wasserstoff enthielt. Das wird aus dem nächsten Paragraphen hervorgehen.

216. **Was mißt die Analyse? Überschlägige Kontrolle des Ergebnisses.** Die Analyse gibt die Bestandteile in Volumprozenten. Das sind aber Volumprozente des trocken gedachten Gases, obwohl ja das Gas bei der Analyse mit Feuchtigkeit gesättigt sein wird. Wenn sich nämlich durch Absorption eines der Bestandteile das Gasvolumen verkleinert, so muß sich ein verhältnismäßiger Teil des in dem Gase vorhanden gewesenen Wasserdampfes niederschlagen; in jedem Kubikcentimeter kann ja, bei bestimmter Temperatur, nur eine ganz bestimmte Menge Wasserdampf vorhanden sein. Ein prozentual gleicher Teil des Wasserdampfes wird also gewissermaßen auch absorbiert. Daher analysiert man trockenes Gas. — Ein Rauchgas also, welches bei der Analyse 12% CO_2, 7,5% O, kein CO und als Rest 80,5% N ergab, kann bei der hohen Temperatur der Rauchgase noch eine beliebige Menge Wasserdampf enthalten haben, sagen wir 6%. Dann haben wir die gesamten Rauchgase mit 106% bezeichnet.

Wenn man beachtet, daß die Analyse sich auf trockenes Gas bezieht, so kann man sich leicht einen Überschlag machen, ob das Ergebnis einer Analyse möglich ist, oder ob ein Fehler vorgekommen ist. Man wird bald bemerken, daß die Stickstoffmenge fast immer größer ist als 79% (so viel war in der zur Verbrennung benutzten Luft); das eben genannte Resultat einer Analyse ist ein Beleg dafür. Es scheint sich der Stickstoff vermehrt zu haben, denn bei der Bildung von CO_2 aus O findet bekanntlich eine Veränderung des Rauminhaltes nicht statt: wenn man von dem geringen Volumen der festen Kohle absieht, so verbinden sich null Raumteile Kohlenstoff mit 2 Raumteilen Sauerstoff zu 2 Raumteilen Kohlensäure. Die Erklärung für das scheinbare Anwachsen des Stickstoffes ist der Wasserstoffgehalt der Kohle. Dieser verbraucht nämlich einen Teil des

Luftsauerstoffes und verbrennt zu Wasser; das Wasser bleibt bei der Analyse ungemessen, daher scheint der zugehörige Sauerstoff verschwunden zu sein und der Stickstoff ist relativ vermehrt worden. Je wasserstoffreicher das Brennmaterial, desto mehr wird die Summe aus O und CO_2 unter 21% bleiben, desto größer wird der Stickstoffgehalt. Ein großer Luftüberschuß, durch geringen CO_2-Gehalt kenntlich, wirkt dem freilich entgegen: bei sehr großem Luftüberschuß analysiert man fast nur Luft mit 79% N. — Als Beispiel können folgende Analysen dienen, die an einem Tage mit ein und derselben Steinkohle erhalten wurden:

CO_2	O	CO	N	l
6,8	12,8	0	80,4	2,49
14,0	4,6	0	81,4	1,27
17,5	0,8	0	81,7	1,03

Bei diesen Analysen war kein Kohlenoxyd gefunden worden. Tritt solches auf, so drückt es den Stickstoffgehalt herab. Bei der Bildung von CO findet nämlich eine Volumenvermehrung statt: null Raumteile Kohlenstoff mit 1 Raumteil Sauerstoff geben 2 Raumteile Kohlenoxyd. Diese Tatsache bewirkt also eine relative Verminderung des Stickstoffes. Das zeigt folgende Analyse, die zwischen den früheren erhalten wurde:

14,7	0,5	5,6	79,2	—

Wie erwähnt, gibt alles dieses einen Anhalt zu beurteilen, ob das Resultat einer Analyse glaubhaft ist.

217. **Probeentnahme.** Es gilt natürlich für die Gasanalyse dasselbe was wir schon anderwärts anführten; die Analyse kann nur die Bestandteile der Probe angeben, welche in den Meßzylinder eingesaugt wurde, und man hat dafür zu sorgen, daß diese Probe den Durchschnittswert der zu untersuchenden Gase wiedergibt. Rauchgase sind wohl stets so innig gemischt, daß die Entnahme irgendwie durch ein einfaches Rohr erfolgen kann. Entnimmt man dicht am Rauchschieber, neben dem stets Luft eingesaugt wird, so sind dadurch Fehler möglich. Auch ist es nicht gleichgültig, an welcher Stelle der Züge man die Probe entnimmt: die Rauchgase nehmen durch das Mauerwerk der Züge hindurch fortwährend Luft auf. So ergaben gleichzeitig genommene Rauchgasproben:

am Ende des Flammrohres: 16,9% CO_2, 2,0% O.
am Fuchs: 11,0% CO_2, 8,8% O.

Ist die Bleileitung zum Orsat undicht, so saugt man natürlich teilweise Luft ein. Wenn man durch eines der Schaulöcher, welche in den Zügen zu sein pflegen, die Probe entnimmt, so muß man ein eisernes Rohr bis in den Feuerzug hineinführen. Endet das Rohr noch innerhalb des Mauerwerkes, so erhält man stets lufthaltiges Rauchgas, weil eben Luft durch das Mauerwerk hindurch gesaugt wird, weil das Mauerwerk lufthaltig ist. Andererseits darf das Entnahmerohr nicht so weit in die

Züge hineinragen, daß es glühend wird. Sonst wird leicht CO_2 durch den am Eisen sitzenden glühenden Ruß reduziert und die Analyse stellt einen Gehalt von CO fest, der in den Rauchgasen gar nicht vorhanden war. Man verschmiert das Schauloch dann mit Ton oder Chamottemörtel, um volle Abdichtung zu erzielen.

Wenn man mit dem Orsat-Apparat eine Probe von 100 ccm den Zügen entnimmt, so erhält man die augenblickliche Zusammensetzung der Rauchgase zur Zeit der Entnahme. Will man die durchschnittliche Zusammensetzung während einer längeren Periode haben, so muß man möglichst häufig Proben entnehmen und den Durchschnittswert der Analyse berechnen. Statt dessen kann man aber auch einen Aspirator während einer längeren — beliebig langen — Zeit sich mit den Rauchgasen füllen lassen. Der Aspiratorinhalt hat dann die durchschnittliche Zusammensetzung der Rauchgase, und man macht eine oder besser zwei Analysen dieses Inhaltes. Letztere Methode ist viel bequemer und gibt wohl auch bessere Durchschnittswerte, aber man will gewöhnlich schon während des Versuches die Zusammensetzung der Gase kennen, um den Betrieb danach anordnen zu können.

Einen Aspirator für solche Zwecke, aus zwei einfachen Glasflaschen zusammengebaut, lernten wir in § 190 kennen. Man muß darauf achten, daß während der Periode des Ansaugens der Niveauunterschied in den Flaschen etwa konstant bleibt, muß also die Flaschen ab und zu verstellen. Sonst erhält man nicht Gasmengen in den Aspirator, die den Zeiten proportional sind, und der Durchschnittswert wird falsch.

218. **Selbsttätige Apparate.** Um eine laufende Kontrolle des Dampfkesselbetriebes zu ermöglichen, hat man Apparate erdacht, welche die Angabe des Kohlensäuregehaltes der Gase selbsttätig bewirken. Ein Gehalt von möglichst 18 bis 19% wäre erwünscht. Trefflich ist der Ados-Apparat der Ados-Feuerungstechnischen Gesellschaft zu Aachen; er bewirkt selbsttätig die Absperrung von 100 ccm Rauchgas, die Absorption in Kalilauge und die Messung der Volumendifferenz, die man ablesen kann, die aber auch graphisch auf einem Papierstreifen alle 10 Minuten verzeichnet wird. — Andere Apparate beschränken sich auf die Feststellung des spezifischen Gewichtes der Rauchgase; Vorrichtungen nach Art der Luxschen Gaswage werden mehrfach als Feuerungskontrolle angeboten; im Staub des Kesselhauses versagen solche feinen Apparate gelegentlich den Dienst. Da Kohlensäure etwa doppelt so schwer ist wie Luft oder Sauerstoff, so läßt ein höheres spezifisches Gewicht der Gase unmittelbar auf höheren Kohlensäuregehalt schließen.

219. **Menge der Rauchgase.** Aus der Rauchgasanalyse kann man auf die Rauchgasmenge schließen, welche den Fuchs passiert. Mißt man auch die Temperatur der Rauchgase, so kann man weiterhin die Wärmeverluste berechnen, welche die Feuerung dadurch erleidet, daß man die

Rauchgase warm abgehen läßt, also nicht ganz ausnutzt. Da man diese Rechnung fast immer im Anschluß an die Rauchgasanalyse durchführt, so sei sie wiedergegeben.

Man muß den Kohlenstoffgehalt der verbrannten Kohle kennen. Man kann ihn zugleich mit dem Heizwert bestimmen, wie im § 195 besprochen wurde. Man kann ihn aber auch bei Steinkohle mit ziemlicher Zuverlässigkeit auf 80 bis 70%, für gute bis schlechte Kohle, schätzen. Er sei im folgenden zu 75% angenommen.

Dann berechnet sich, unter Verwendung der Atomgewichte $C = 12$ und $O = 16$, das aus 1 kg Kohle gebildete Rauchgasvolumen V_1 wie folgt: Der Kohlenstoff, bei unserer Annahme 0,75 kg, ergibt bei vollkommener Verbrennung $0{,}75 \cdot \frac{12 + 2 \cdot 16}{12} = 2{,}75$ kg CO_2; das spezifische Gewicht der CO_2 ist $\gamma_0 = 1{,}98 \frac{\text{kg}}{\text{cbm}}$; also entstehen aus 1 kg unserer Kohle, enthaltend 0,75 kg Kohlenstoff, $\frac{2{,}75}{1{,}98} = 1{,}40$ cbm $(^0_{760})$ CO_2. Wäre die Verbrennung unvollkommen gewesen, so wären $0{,}75 \cdot \frac{12 + 16}{12} = 1{,}75$ kg CO gebildet worden, oder, mit $\gamma_0 = 1{,}25 \frac{\text{kg}}{\text{cbm}}$: es wären 1,40 cbm $(^0_{760})$ CO gebildet worden. Gleichgültig also, ob die Verbrennung zu CO oder zu CO_2 erfolgt, es bilden sich immer 1,40 cbm Gas (bezogen auf 0° und 760 mm BStd). Diese 1,40 cbm stellen nun den Gehalt der Rauchgase an CO_2 und CO dar, den wir aber aus der Analyse auch in Prozenten der Gesamtmenge kennen. Also folgt die Gesamtmenge durch einen einfachen Regeldetri-Ansatz.

Habe die Analyse etwa 14,7% CO_2, 0,5% O, 5,6% CO und also 79,2% N ergeben, so folgt das Rauchgasvolumen V_1 aus $V_1 : 1{,}40 = 100 : (14{,}7 + 5{,}6)$; es ist $V_1 = \frac{100}{1{,}40 \cdot 20{,}3} = 3{,}52$ cbm $(^0_{760})$.

Habe eine andere Analyse ergeben 6,8% CO_2, 12,8% O, kein CO, also 80,4% N, so ist $V_1 = \frac{100}{1{,}40 \cdot 6{,}8} = 16{,}37$ cbm $(^0_{760})$.

Zu beachten bleibt indes, daß dies nur das Volumen des wasserfrei gedachten Rauchgases ist. Die Analyse gibt ja nur die Bestandteile des getrockneten Gases an (§ 216). Diese Tatsache zu berücksichtigen ist nicht üblich, dann aber erhält man das Rauchgasvolumen und mit ihm die Essenverluste um etwa 10%, bei Braunkohle noch mehr, zu klein. Für die Beurteilung der Verbrennungsvorgänge ist das nicht sehr von Belang, die Essenverluste indessen erhält man zu niedrig. Genau ist der Wasserdampfgehalt auch schwer zu bestimmen, leicht aber annähernd auf folgende Weise.

Aus der Bestimmung des unteren Heizwertes der Kohle in der Bombe weiß man, wieviel Wasser, hygroskopisch und durch Verbrennung entstanden, aus jedem Kilogramm verbrannter Kohle erzeugt wird; es ist meist etwa das halbe Kohlengewicht. Nehmen wir an, wir hätten mit der Bombe ermittelt, daß 0,45 kg Wasser aus 1 kg Kohle entstehen, so können wir unser Beispiel von oben fortführen. Dampf ist, bei 0° C, etwa 0,62mal so schwer wie Luft; er wöge also, wenn wir ihn, ohne daß er kondensiert, auf die normalen Verhältnisse bringen könnten, $0{,}62 \cdot 1{,}293 = 0{,}80 \frac{\text{kg}}{\text{cbm}}$. Darin, daß wir diese Zahl für einen fingierten Normalzustand annehmen, und weiter den Dampf behandeln, als folgten seine Druck- und Volumänderungen dem Mariotte-Gay-Lussacschen Gesetz — darin liegt es, daß unsere Rechnung nur angenähert ist. Wir hätten danach $\frac{0{,}45}{0{,}8} = 0{,}56$ cbm Wasserdampf aus jedem Kilogramm unserer Kohle erzeugt. Die oben aus den beiden Analysen errechneten Rauchgasvolumina sind also noch auf $V_1 = 4{,}08$ cbm und auf $V_1 = 16{,}93$ cbm zu erhöhen. Die Nichtbeachtung des Dampfgehaltes hätte Fehler von 14% und von 3,3% im Gefolge gehabt. —

Die ganze Berechnung bezog sich auf 1 kg verbrannter Kohle. Man hat das hierauf bezogene Rauchgasvolumen V_1 mit der stündlich verbrannten Kohlenmenge K zu vervielfachen, um das stündlich durch den Fuchs gehende Volumen zu erhalten: $V_0 = K \cdot V_1$.

Wollten wir endlich nicht das auf 0° und 760 mm BStd reduzierte Rauchgasvolumen haben, sondern wollten wir, etwa um die Rauchgasgeschwindigkeit im Fuchs zu finden, das wirkliche Rauchgasvolumen kennen, so hätten wir Druck und Temperatur im Fuchs zu messen und eine entsprechende Umrechnung zu machen. Hierbei würden wir einfachheitshalber den Wasserdampf wie ein Gas behandeln.

220. **Essenverluste.** Die Essenverluste selbst sind nun offenbar gleich dem Produkt aus der Rauchgasmenge, der spezifischen Wärme der Rauchgase und ihrer Temperatur über jene der Umgebung hinaus. Die spezifische Wärme der Rauchgase bleibt also auch noch zu bestimmen.

Die spezifischen Wärmen der Einzelgase, bezogen auf ihr reduziertes Volumen, sind $c_p = 0{,}306 \frac{\text{WE}}{^0\text{C} \cdot \text{cbm}}$ für CO, O, N, H und auch annähernd für Wasserdampf; die spezifische Wärme der CO_2 ist $c_p = 0{,}474 \frac{\text{WE}}{^0\text{C} \cdot \text{cbm}}$.

Ein Rauchgas also, welches 14,7% CO_2 enthält und noch aus 85,3% O, CO und N besteht, hat eine spezifische Wärme, folgend aus $14{,}7 \cdot 0{,}474 + 85{,}3 \cdot 0{,}306 = 100 \cdot c_p$. Es wäre also $c_p = 0{,}331 \frac{\text{WE}}{\text{cbm}}$.

Hiernach lassen sich die Essenverluste berechnen, welche stattfänden, wenn das Gas keinen Wasserdampf enthielte. Wir haben aber gesehen, daß der Wasserdampf einen recht wesentlichen Bestandteil des Rauchgases ausmacht, selbst bei Steinkohle. Man wird also gut tun, den Wärmeverlust durch Wasserdampf nicht zu vernachlässigen, wie es üblich ist. Allerdings ist die latente Wärme des Wasserdampfes schon insofern berücksichtigt, als ja ihretwegen nur der untere Heizwert für den Brennstoff angesetzt ist. Nur der Mehrinhalt an Wärme über etwa 600 WE pro Kilogramm Dampf hinaus, nur der Verlust aus spezifischer Wärme des Dampfes bleibt noch zu berücksichtigen. Die spezifische Wärme eines Kubikmeters Wasserdampfes, reduziert wie im vorigen Paragraphen besprochen, ist etwa 0,306 zu setzen, d. h. ebenso groß wie die spezifische Wärme von O, CO, N.

Hätte daher, wie im vorigen Paragraphen besprochen, das Rauchgas außer den 14,7 % CO_2 und 85,3 % O, CO und N, zusammen 100 %, noch 14 % Wasserdampf enthalten, so folgt seine spezifische Wärme aus $14{,}7 \cdot 0{,}474 + (85{,}3 + 14) \cdot 0{,}306 = (100 + 14) \cdot c_p$, also wäre diesmal $c_p = 0{,}328 \frac{\text{WE}}{{}^0\text{C} \cdot \text{cbm}}$.

Nun wollen wir auch noch die Essenverluste selbst unter Annahme einer Fuchstemperatur von 300° ermitteln, und zwar, des Vergleichs wegen, ohne und mit Berücksichtigung des Wasserdampfgehaltes. Im ersten Fall hatten wir nach dem vorigen Paragraphen 3,52 cbm $(^0_{760})$, im anderen 4,08 cbm $(^0_{760})$ aus dem Kilogramm Kohle erhalten. Demnach werden die Essenverluste

ohne Beachtung des Wasserdampfgehaltes $3{,}52 \cdot 0{,}331 \cdot 300 = 350$ WE,
mit Beachtung des Wasserdampfgehaltes $4{,}08 \cdot 0{,}328 \cdot 300 = 402$ WE.

Bei der anderen Analyse des vorigen Paragraphen mit 6,8 % CO_2 hätten wir die Essenverluste erhalten

ohne Beachtung des Wasserdampfgehaltes $16{,}37 \cdot 0{,}317 \cdot 300 = 1556$ WE,
mit Beachtung des Wasserdampfgehaltes $16{,}93 \cdot 0{,}316 \cdot 300 = 1608$ WE.

Der Unterschied von rund 50 WE zwischen beiden Rechnungsarten macht also immerhin $^2/_3$ % eines Heizwertes von 7500 WE aus, trotzdem wir eine Kohle mit wenig Wassergehalt benutzt hatten.

221. **Raum- und Gewichtsprozente.** Man wird bemerkt haben, daß es seine Vorteile hat, den Rechnungen das reduzierte Volumen der Gase zugrunde zu legen, weil nämlich die spezifischen Wärmen einer Anzahl von Gasen bezogen auf Volumen die gleichen sind, nicht aber bezogen auf Gewicht. Auch die Tatsache war bequem, daß aus einer gegebenen Menge Kohlenstoff immer das gleiche Volumen Verbrennungsprodukt sich ergibt, möge nun CO_2 oder CO entstehen. Überhaupt gehorchen die chemischen Reaktionen der Gase glatten Raumverhältnissen.

Trotzdem kann man in die Lage kommen, eine Rechnung nach Gasgewichten vorzuziehen. Die Umrechnung einer Angabe nach Raumprozenten in Gewichtsprozente wird also gelegentlich nötig. Ein Beispiel wird ohne weitere Erläuterung die Umrechnung zeigen:

	CO_2	O	CO	N
Raumprozente, oder 100 cbm bestehen aus:	14,7	0,5	5,6	79,2
spezifisches Gewicht, $\frac{kg}{cbm}$:	1,98	1,43	1,25	1,26
Produkt, d. i. Gewicht des betreffenden Gases in 100 cbm: zusammen 136,6 kg.	29,1	0,7	7,0	99,8
Also Gewicht des betreffenden Gases in 100 kg, oder Gewichtsprozente:	21,3	0,5	5,0	73,2

222. **Analyse anderer Gase; Bestimmung von Kohlenwasserstoffen und *H*.** Kraftgase enthalten im allgemeinen Kohlenoxyd CO und Wasserstoff H als Hauptbestandteile, ferner Methan CH_4 und schwere Kohlenwasserstoffe in kleineren Mengen, endlich CO_2, O und N als nutzlosen Ballast. Es handelt sich darum, diese Bestandteile zu bestimmen.

Man bestimmt zunächst schwere Kohlenwasserstoffe, indem man den Volumverlust des Gases bei Berührung mit rauchender Schwefelsäure ermittelt; diese absorbiert die schweren Kohlenwasserstoffe. Weiterhin kann man der Reihe nach CO_2, O und CO durch Absorption in Kalilauge, Pyrogallussäure und Kupferchlorür bestimmen, wie bei der Rauchgasanalyse. Der Gasrest enthält noch Wasserstoff und Methan.

Diese beiden bestimmt man, indem man sie verbrennt. Dazu mischt man den Gasrest oder einen bestimmten Teil davon mit einer bestimmten Menge Luft, so daß man das Gesamtvolumen der Mischung wieder kennt. Führt man die Mischung nun zunächst über Platinschwamm, so findet, wie vom Döbereinerschen Feuerzeug her bekannt ist, eine Verbrennung des Wasserstoffes statt. Da das gebildete Wasser sich verflüssigt, so vermindert sich bei der Verbrennung das Gasvolumen um die Menge der zur Verbrennung verbrauchten Gase, 2 Teile Wasserstoff und 1 Teil Sauerstoff. Der Wasserstoffgehalt war also zwei Drittel des verschwundenen Gasvolumens und läßt sich dann in Prozente des ursprünglichen Kraftgases umrechnen. Führt man weiterhin den Gasrest über einen elektrisch glühenden Platindraht, so wird hierdurch die Verbrennung des Methans herbeigeführt. Hierbei wird nun wiederum eine Volumenverminderung herbeigeführt, und man kann aus dieser auf die verbrannte Methanmenge schließen: da aus 1 Raumteil CH_4 und 2 Raumteilen O bei der Verbrennung nur 1 Raumteil CO_2 entsteht — das gebildete Wasser wird verflüssigt — so war die Methanmenge ein Drittel der diesmal beobachteten Volumenkontraktion. Man kann statt dessen auch die Methanmenge aus der

gebildeten CO_2 bestimmen, indem man diese in Kalilauge absorbieren läßt: das gebildete Volumen CO_2 ist gleich dem verbrannten CH_4-Volumen.

Es lassen sich nun zur Ausführung aller dieser Operationen Apparate konstruieren, welche im Prinzip wie der Orsat-Apparat eingerichtet sind, nur daß sie noch ein Absorptionsgefäß mehr enthalten, für rauchende Schwefelsäure, außerdem hat man noch zwei Verbrennungsgefäße hinzuzufügen, deren eines Platinschwamm enthält, deren anderes eine Platinspirale birgt, die elektrisch zum Erglühen zu bringen ist. Die Handhabung ist offenbar die, daß man 100 ccm zu untersuchendes Gas in den Meßzylinder saugt, der Reihe nach in die vier Absorptionsgefäße für schwere Kohlenwasserstoffe, CO_2, O und CO überführt und die absorbierten Volumina mißt. Vom Gasrest behält man etwa 10 ccm im Meßzylinder und treibt das übrige ins Freie, worauf man Luft zum Verbrennen einsaugt bis man wieder 100 ccm hat. Dieses mit Luft verdünnte Gas untersucht man auf H und CH_4.

Die Beschreibung eines solchen Apparates wollen wir übergehen; wir verweisen wieder auf Winklers Technische Gasanalyse, oder aber auf einen Aufsatz in der Zeitschrift „Stahl und Eisen“ vom 15. Februar 1903. Der dort beschriebene erweiterte Orsat-Apparat hat leidliche Resultate ergeben. Immerhin sind solche Untersuchungen in den Händen des Nichtchemikers eine undankbare, weil oft erfolglose Sache.

Über die Berücksichtigung des Wasserdampfgehaltes gilt hier ähnliches wie für die Rauchgase.

Literatur- und Bezugsquellen-Verzeichnis.

Z. V. D. I. bedeutet: Zeitschrift des Vereines Deutscher Ingenieure.

Allgemeines.

Carpenter, Experimental Engineering, 5. Aufl., New York 1901, 694 Seiten, bringt das ganze im Vorstehenden behandelte Gebiet, ferner Materialprüfungen und die Ausführung von Maschinenuntersuchungen zur Darstellung, im allgemeinen mehr beschreibend als kritisch und in recht unübersichtlicher Form.

Brand, Technische Untersuchungsmethoden, insbesondere zur Kontrolle des Dampfbetriebes, bespricht Ähnliches wie vorliegende Arbeit, ist indes theoretisch nicht ganz ausreichend.

Kohlrauch, Praktische Physik, ist ein klassisches Werk über physikalische Messungen; vieles daraus wird auch für technische Zwecke brauchbar sein. Eine kleinere Ausgabe führt den Namen „Leitfaden der praktischen Physik".

Zahlreiche einzelne Instrumente findet man namentlich nach der theoretischen Seite hin besprochen in: Grashof, Theoretische Maschinenlehre, und Weisbach, Ingenieurmechanik.

Breslauer, Technische Meßinstrumente, ist eine wenig wertvolle Zusammenstellung.

Flather, Dynamometers and the measurement of power.

Niethammer, Elektrotechnisches Praktikum, behandelt auch einiges über Maschinenmessungen.

Landolt und Börnstein, Physikalisch-chemische Tabellen, ein umfangreiches Sammelwerk von Zahlenwerten, tut gute Dienste bei der Auswertung, wo das bekannte „Taschenbuch der Hütte" seinen Dienst versagt. Neue Auflage in Vorbereitung.

Größere Versuchseinrichtungen, bei denen naturgemäß eine große Reihe von Einzelmessungen und Instrumenten beschrieben sind, findet man beschrieben unter anderem in: E. Meyers Untersuchungen über Explosionsmotoren, Z. V. D. I. 1895 bis jetzt.

Slaby, Kalorimetrische Untersuchungen über den Kreisprozeß der Gasmaschine, Verhlg. d. Vereins z. Beförd. d. Gewerbfl. 1891 ff., auch als Buch erschienen.

Frese, Ingenieurlaboratorium Hannover, Z. V. D. I. 1900.

Martens und Guth, Die Materialprüfungsanstalten der Technischen Hochschule Berlin.

Haack, Schiffswiderstand und Schiffsbetrieb, Versuche am Dortmund-Ems-Kanal. Z. V. D. I. 1900.

Lindley, Versuche an einer Dampfturbine (Elberfeld) Z. V. D. I. 1900.

Leistungsversuche an Schnellzuglokomotiven, Engineering 4. 11. 1898.

Steam engine testing apparatus, Manchester School of Techn. Engineering Record 15. 11. 1902.

Stanton, Tests on centrifugal pumps, Engineering 1903.

Burstall, Versuche an Gasmotoren, Engineering 1898.

Glazenbrook, The National Physical and Engineering Laboratory, Engineering 1903.

Farwell, Tests of a... fan and engine, Engineering News 1903.

Beschreibungen von Dynamometerwagen (Prüfwagen für Eisenbahnen) Z.V.D.I. 1902, S. 1444; Elektrot. Z. 1904, S. 65; Engineering News 15. 5. 1902; Trans. American Inst. Electr. Eng Mai 1902 (Arnold).

Zu Kapitel IV. Längenmessung.

Literatur: Berücksichtigung der Temperatur bei Längenmessung. Z.V.D.I. 1902, S. 329. — Reuleaux, Amerikanische Feinmeßvorrichtungen. Verhandlg. Gewerbfl. 1894, Heft 3, S. 142. — Prégel, Feinmessungen im Maschinenwesen. Dingler 1894, Bd. 292, S. 1, 35, 79. — Schlesinger, Messen in der Werkstatt und Herstellung austauschbarer Teile. Z. V. D. I. 1903, S. 1379. — Galassini, Instruments de mesure de haute précision pour les ateliers mécaniques. Revue de méc. Juli 1903. — Feinmeßmaschine von Cooke & Sons, York, für van der Kerchove. Engineering 30. 11. 1894.

Bezugsquellen: Für Werkstatt-Meßinstrumente sind J. E. Reinecker, Chemnitz-Gablenz und Ludwig Loewe & Co., Berlin NW., Huttenstr. 17, die ersten Firmen. Auch Hommel, Mainz, sei genannt. Ganz feine Längenmeßinstrumente (für Uhrmacher z. B.) liefern Strasser & Rohde, Glashütte in Sachsen. Amerikanische Instrumente vorzüglicher Qualität bezieht man von Schuchardt & Schütte, Berlin C., Spandauerstr. 59.

Zu Kapitel V. Flächenmessung.

Literatur: Theorie des Planimeters, von Kirsch. Z. V. D. I. 1890, S. 1053; von Land. Z. V. D. I. 1899, S. 1064. — Patch, Some observations on the use of polar planimeters. Engineering News 13. 4. 1899. — Lorber, Über Coradis Kugelrollplanimeter. Z. f. Vermessungswesen 1888, S. 161. — Prytz Stangenplanimeter. Engineering 1896, S. 205, 255, 347. — Über Integraphen. Dingler 1890, Bd. 275, S. 17; Zeitschr. f. Instrumentenkunde 1904, S. 213. — Abdank-Abakamowicz, Die Integraphen (Buch).

Bezugsquellen: Einfache Polarplanimeter liefert jede Firma für technische Meßinstrumente, Preis etwa 60 Mk. Sie entstammen meist der Fabrik von I. Amsler-Laffon & Sohn, Schaffhausen. Außer dieser Firma sind noch G. Coradi, Zürich, und A. Ott, Kempten in Bayern, als Fabrikanten verschiedenartiger Planimeter zn nennen. Integraphen baut Coradi, Preis 400 bis 600 Mk.

Zu Kapitel VI. Zeitmessung.

Präzisionsuhren, die auch für technische Zwecke (Kontaktgeben) verwendet werden können, liefert z. B. Strasser & Rohde, Glashütte in Sachsen; Clemens Riefler, Nesselwang in Bayern; billiger (200—300 ℳ) sind die elektrisch betriebenen Uhrwerke von Peyer, Favarger & Co., Neuchatel. — Arretieruhren liefert jeder Uhrmacher, auch H. Maihak, Hamburg, und Schuchardt & Schütte, Berlin C., Spandauerstr. 59.

Zu Kapitel VII. Messung der Geschwindigkeit.

Literatur: Neuerungen an Vorrichtungen z. Anzeigen der Fahrgeschwindigkeit, Dingler 22. 2. 1895. — Grays, Elektrisches Schiffslog. Z. V. D. I. 1901, S. 933. — Versuche der Physik. Technischen Reichsanstalt mit Brauns Gyrometer. Z.V.D.I. 1896, S. 186; vgl. dies. 1894, S. 475. — Benischke, Elektrische Geschwindigkeitsmeßapparate. Elektrot. Z. 21. 5. 1903. — Schmidt, Gleichung der Woltmannschen Flügel, graphische Bestimmung der Flügelgleichung. Z. V. D. I. 1895, S. 917; 1903, S. 1698. —

Recknagel, Verteilung der Luftgeschwindigkeit über den Querschnitt des Rohres (Stauscheibe). Z. f. Kälteindustrie 1899, S. 172. — Recknagel, Pneumometer. Gesundheitsingenieur 1899, S. 255. — Williams, Experiments at Detroit on the flow of water in curved pipes. Proc. Amer. Soc. Civ. Eng. 10. 11. 01 (Pitotrohr).

Bezugsquellen: Tachometer, Preis 50 bis 100 Mk., werden von Schaeffer & Budenberg, Magdeburg-Buckau, gebaut, ferner von einer Reihe von Spezialfirmen: Dr. Th. Horn, Leipzig-Großzschocher; J. Bundschuh, Magdeburg; Wilhelm Morell, Leipzig-Volkmarsdorf; Rheinische Tachometerbau-Gesellschaft, Freiburg i. B. Letztere liefert auch Bifluid-Tachometer. Tachographen zur Aufnahme von Tourenschwankungen liefert nur Dr. Th. Horn, Preis 400 Mk. und mehr. — Hydrometrische Flügel, Preis von 100 Mk. an, baut A. Ott, Kempten i. Bayern; T. Ertel & Sohn, München. Anemometer, Preis 40 bis 150 Mk. sind von R. Fueß, Steglitz b. Berlin, die Luftgeschwindigkeitsmesser mit Stauscheibe von G. Stollnreuther & Sohn, München, oder von G. A. Schultze, Charlottenburg, Charlottenburger Ufer 53, zu beziehen.

Zu Kapitel VIII. Messung der Stoffmenge.

Literatur: Messung des spezifischen Gewichts: Slaby, Kalorimetrische Untersuchungen (s. o.). — Krells Rauchgasanalysator. Z. V. D. I. 1900, S. 157. — Pfeiffer, Zur Bestimmung des spezifischen Gewichtes von Leuchtgas. Schillings Journal 1903, S. 451.

Wägen: Brauer, Konstruktion der Wage, erschienen 1883, ist eine rein theoretische Arbeit. Der Atlas enthält gute Abbildungen älterer Formen. — Grubeck, Neuerungen im Bau der Wagen für Fahrzeuge (gut). Z. V. D. I. 1896, S. 206. — Wagen von C. Schenck: Glasers Annalen 1. 7. 1900. — Selbsttätige Kohlenwage von Schenk, Z. V. D. I. 1903, S. 113. — Neuerungen an Wägehebel und Entlastungsvorrichtung, Organ für Fortschritte des Eisenbahnwesens 1895, Heft 2, S. 31.

Wassermessung: Wassermeßgefäße im Ingenieurlaboratorium Stuttgart: Z. V. D. I. 1901, S. 1338. — Undeutsch, Absolutes und relatives Messen der Undichtheit von Gefäßwandungen. Österr. Zeitschr. f. Berg-, Hütten- und Salinenwesen 1890, S. 235. — Brauer, Neues Verfahren zur Wassermessung. Z.V.D.I. 1892, S. 1493. — Francis, Lowell hydraulic experiments (Buch, klassische Wehrmessungen). — Frese, Überfallmessungen. Z. V. D. I. 1890, S. 1285. — Hansen, Überfallmessungen. Z. V. D. I. 1892, S. 1057. — Berndt, Gieseler, Benutzung von Pitotrohr oder Flügel zur Wassermessung. Z. V. D. I. 1885, S. 700, 982. — Dicharge measurement on the Niagara River, verschiedene Geschwindigkeitsmesser, Engineering News 28. 12. 1899. — Schönheyder, Water meters, Zusammenstellung von Konstruktionen, Engineering 1900. — Wassermesser-Normalien, Schillings Journal 22. 7. 1899. — Strubler, Erfahrungen mit Wassermessern beim Dampfkesselbetrieb. Schweiz. Bauztg. 1890, Bd. 16, S. 74. — Hot water meters in boiler practice. Iron Age 19. 11. 1903. — Lux, Wassermesserverbindungen. Z. V. D. I. 1896, S. 923. — Lux, Wassermesserprobierstation, Schillings Journal 1894, S. 322. — Venturi-Meter. Journal o. t. Franklin Inst. 1899, S. 108.

Gasmessung usw.: Lebrecht, Versuche mit raschlaufenden Kompressoren, worin sehr lehrreiche Vergleiche zwischen verschiedenen Luftmeßmethoden gezogen werden. Z. V. D. I. 1905, S. 151. — E. Meyer, Bestimmung des Gasverbrauchs mittels Glocke, Z. V. D. I. 1899, S. 483. — Normaleichungs-Kommission, Bildliche Darstellung der eichfähigen Gasmesser, großes Figurenwerk mit Text. — Homann, Eichfähige Gasmesserkonstruktionen. Schillings Journal 1893. — Poplawsky, Kubizierapparat für Gasmesser; Der Eichkolben zur Prüfung der Kubizierapparate (Bücher). — Peabody & Kuhnhardt, Flow of steam through orifices. Engineering Bd. 49, S. 64.

Bezugsquellen: Die Luxsche Gaswage wird geliefert von den Luxschen Industriewerken, Ludwigshafen a. Rh. — Brückenwagen bezieht man von den Garvenswerken, Wülfel vor Hannover; Carl Schenck, Darmstadt; A. Dinse, Berlin N., Müllerstr. 156 und anderen. — Den Kolbenwassermesser von Schmid liefert Emil Kegler, Düsseldorf; Flügelradwassermesser bauen Siemens und Halske, Berlin W., Markgrafenstr. 94; Dreyer, Rosenkranz & Droop, Hannover; Luxsche Industriewerke, Ludwigshafen a. Rh. u. and , auch in besonderer Ausführung für Speisewassermessung. — Gasmesser baut S. Elster, Berlin NO., Neue Königstr. 67; Julius Pintsch, Fürstenwalde a. Spree.

Zu Kapitel IX. Messung der Spannung.

Literatur: Rosenkranz, Neuerungen an Federmanometern. Z. V. D. I. 1896, S. 495. — Manometer der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt. Z. V. D. I. 1900, S. 261. — Jacobus, Messung von Drucken von 700 at und mehr. Engineering New 1897, S. 327. — The estimation of high pressures. Engineering 9. 1. 1903. — Quecksilbermanometer mit Verdränger. Z. V. D. I. 1900, S. 245. — Der Langen-Luxsche einschenklige Druckmesser. Schillings Journal 1890, S. 217. — Zugmesser für Dampfkesselfeuerung, verschiedene Konstruktionen kritisiert. Dingler 1903, Bd. 318, S. 225. — Krell, Hydrostatische Meßinstrumente (Buch).

Bezugsquellen: Feder-, Kolben- und Quecksilbermanometer sowie Zugmesser in sehr wechselnder Preislage, liefern Schaeffer & Budenberg, Magdeburg; Dreyer, Rosenkranz & Droop, Hannover; Julius Blancke, Quedlinburg; J. C. Eckardt, Cannstadt. Die besprochenen einschenkligen Druckmesser liefern die Luxschen Industriewerke, Ludwigshafen a. Rh. Das Recknagelsche Differentialmanometer bezieht man von G. Stollnreuther & Sohn, München; ähnliche Apparate von G. A. Schultze, Charlottenburg, Preis 150 bis 200 Mk.

Zu Kapitel X. Messung von Kraft, Drehmoment, Arbeit, Leistung.

Literatur: Dynamometer usw. Kovarik, Über Absorptions- und Transmissionsdynamometer, zusammenstellende Beschreibung. Wochenschrift d. österr. Ingen.-Vereins 1891, S. 301. — Dynamomètre à pression hydraulique, mißt Reaktion der Schiffswelle. Génie civil 18. 2. 1899. — Fischingers Arbeitsmesser. Zeitschr. f. Elektrotechnik 1891, S. 537. — Maihak, Registrierendes Transmissionswellendynamometer von Amsler-Laffon. Z. V. D. I. 1892, S. 1510. — Kohn, Riemendynamometer. Zeitschr. d. Österr. Ingen.- und Archit.-Vereines 20. 12. 1895. — Frahm, Untersuchungen über dynamische Vorgänge in Wellen. Z. V. D. I. 1902, S. 797. — Gutbrod, Lokomotivprüffeld auf der Weltausstellung St. Louis. Z. V. D. I. 1904, S. 1321.

Bremsen: Brauer, Bremsdynamometer u. verwandte Kraftmesser. Z.V.D.I. 1888, S. 56. — Frese, Die selbsttätige Bremse D. R. P. Degn Nr. 94718, hat sich bewährt. Z.V.D.I. 1900, S. 244. — Brauer, 300 PS-Bremse auf Zahnrad laufend. Z.V.D.I. 1903, S. 1604. — Goss, Neue Formen von Reibungsbremsen. Industries and Iron, 5. 7. 1895. — Weighton, Froude-Bremse des Durham-College. Engineer, 22. 1. 1897, auch 20. 6. 1902. — Froude-Bremse, Transactions o. t. Inst. of Mechan. Engineers 1877. — Feußner, Wirbelstrombremsen (kleine Modelle). Elektrot. Zeitschr. 1901, S. 608. — Rieter, Elektrisches Präzisionsbremsdynamometer. Elektrot. Zeitschr. 1901, S. 195.

Elektrische Leistungsmessung. Lindley, Schröter und Weber, Versuche an einer Dampfturbine mit Wechselstrommaschine. Z. V. D. I. 1900, S. 829. — Marek, Messung mit Präzisionsinstrumenten. Elektrot. Zeitschr. 1902, S. 447. — Über elektrische Messungen im allgemeinen kann man sich in Niethammer, Elektrotechnisches Praktikum, Stuttgart 1902, Rat holen.

Indizieren: Rosenkranz, Der Indikator, ein vielbenutztes Werk; Pichler, Der Indikator; aus diesen beiden Werken und den Katalogen der Firmen kann man sich über die Einrichtung der Indikatoren und der Zubehörteile informieren. — Neuerungen an Indikatoren. Dingler 14. 2. 1903. — Indikator von Wayne, mit auf Drehung beanspruchter Feder, wird für Präzissionszwecke sehr gelobt in Burstall, Engineering 1898; vgl. Chevillard, Revue industrielle 1895, S. 201. — Rosenkranz, Neuerungen an Indikatoren, Z V. D. I. 1902, S. 1003. — Wagener, Vorschläge über weitere Ausbildung der Indikatoren, Z. V. D. I. 1903, S. 348. — Roser, Prüfung von Indikatorfedern. Z. V. D. I. 1902, S. 1575. — Förster, Beitrag zur Bestimmung der Federmaßstäbe. Z. V. D. I. 1903, S. 319. — Eberle, Prüfung von Indikatorfedern. Zeitschr. des bayer. Dampfkessel-Revisions-Vereine, August 1901. — Wiebe u. Schwirkus, Beiträge zur Prüfung von Indikatorfedern. Z. V. D. I. 1903, S. 55. — Fliegner, Dynamische Theorie des Indikators (mathematische Entwicklungen über Massenschwingungen). Schweiz. Bauzeitung, Bd. 18, S. 27. — Frese, Beeinflussung der Indikatordiagramms der Dampfmaschine durch die Art der Anbringung des Indikators; sehr lehrreicher Experimentalaufsatz. Z. V. D. I. 1885, S. 769. — Goß, Einfluß langer Rohrleitung. Z. V. D. I. 1896, S. 743. — Frese, Einfluß der Massenwirkung der Trommel. Z. V. D. I., 1900, S. 245. — Leitzmann, Versuche an Lokomotiven, zwangläufige Bewegung der Papiertrommel. Z. V. D. I. 1898.

Bezugsquellen: Das Fischinger-Dynamometer liefert E. G. Fischinger, Dresden-A., Johann Georgen-Allee 13, Preis von 600 ℳ an; verschiedene Dynamometer bauen J. Amsler-Laffon & Sohn, Schaffhausen und I. J. Rieter in Winterthur. Letzterer liefert auch Wirbelstrombremsen. Für Warmfederindikatoren ist an erster Stelle Dreyer, Rosenkranz & Droop in Hannover zu nennen; ferner Schaeffer & Budenberg in Magdeburg; H. Maihak in Hamburg, Große Reichenstr. 45. An Kaltfederindikatoren kommen die von Dreyer, Rosenkranz & Droop weniger in Betracht. Empfehlenswert ist der Willner-Indikator von Maihak und der Indikator 1903 von Schaeffer & Budenberg; der während der Drucklegung erschienene Indikator von Ludwig Tesdorpf in Stuttgart, den Verfasser aus Erfahrung nicht kennt, ist vielleicht besonders brauchbar. Die erwähnten Spezialindikatoren und Spezialausrüstungen liefern wohl alle genannten Fabriken, Indikatoren mit 4 cm-Kolben baut Dreyer, Rosenkranz & Droop. Einfache Indikatoren mit notwendigem Zubehör kosten 160 Mk. und mehr, Hubreduktoren von 65 Mk. an. Spezielle Einrichtungen verteuern natürlich den Indikator.

Zu Kapitel XI. Messung der Temperatur.

Literatur: Holborn, Messungen am Le Chatelier Element. Z. V. D. I. 1897, S. 226. — Messung hoher Temperaturen, Zusammenstellung der Methoden; Dingler, Bd. 286, S. 43; Proceedings Instit. Civil Engineers Bd. 110, S. 152. — Schütz, Neue Methoden für Messung hoher Temperaturen. Z. V. D. I. 1904, S. 155. — Pneumatisches Pyrometer für Hochöfen. Stahl und Eisen, 1. 5. 1899.

Bezugsquellen: Thermometer und die meisten in den folgenden Kapiteln erwähnten Apparate bezieht man aus physikalisch-chemischen Gerätehandlungen, von denen wir anführen: Vereinigte Fabriken für Laboratoriumsbedarf, Berlin N., Chausseestr. 3; Warmbrunn, Quilitz & Co., Berlin NW., Heidestr. 55/57; Max Kohl, Chemnitz; Dr. Robert Muencke, Berlin NW., Luisenstr. 58. Le Chatelier- und Eisen-Konstantan-Pyrometer mit Galvanometer fertigen Keiser & Schmidt, Berlin N., Johannisstr. 20. — Preis der von der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt geeichten, sowie der hochgradigen Thermometer etwa 30 Mk., des Le Chatelier-Pyrometers komplett 300 Mk.

Zu Kapitel XII. Messung der Wärmemengen.

Literatur: Staus, Abgaskalorimeter für einen Gasmotor. Z. V. D. I. 1902, S. 649. — Testing electric generators by air calorimetry. Engineering 4. 12. 1903.

Zu Kapitel XIII. Messung des Heizwertes von Brennstoffen.

Literatur: Bujard, Bombe und Neuerungen daran. Dingler 5. 11. 1897. — Wolff. Kalorimetrische Untersuchungen. Z. V. D. I. 1897, S. 763; 1899, S. 331. Flugblätter Nr. 1 und 6 des Magdeburger Vereins für Dampfkesselbetrieb; zu beziehen von diesem. — Bunte, Zur Wertbestimmung der Kohle. Schillings Journal 1891, S. 41. — Hempelsches Kalorimeter. Schillings Journal 12. 9. 1903. — E. Meyer, Festlegung des Begriffes Heizwert, Z. V. D. I. 1899, S. 282. — Heizwertbestimmung von Leuchtgas, Schillings Journal 14. 9. 1901. — Hempels Gaskalorimeter. Zeitschrift für angew. Chemie 1901, S. 713.

Bezugsquellen: Außer aus oben genannten Apparate-Handlungen kann man beziehen: die Krökersche Bombe (Preis 400 Mk. oder mehr) von Julius Peters, Berlin NW., Thurmstr. 4; die Hempelsche Bombe von A. Kühnscherf & Söhne, Dresden; das Junkers-Kalorimeter (Preis 450 Mk.) von Junkers & Co., Dessau. Das Parrsche Bombenkalorimeter (in Deutschland vertrieben von Max Kohl in Chemnitz) ist billiger, aber nicht empfehlenswert.

Zu Kapitel XIV. Messung der Feuchtigkeit.

Literatur: Wolpert, Heizung und Lüftung, Bd. II, Hygrometrie. — Fuchs, Beiträge zur Bestimmung der atmosphärischen Feuchtigkeit in Trockenanlagen. — Möller, Bestimmung des Wassergehalts im Kesseldampf (Zusammenstellung der Verfahren). Z. V. D. I. 1895, S. 1059; dasselbe von Lüders, Z. V. D. I. 1893, S. 566. — Rademacher, Begriff des trockenen Dampfes, Z. V. D. I. 1893, S. 80.

Bezugsquellen: Hygrometer, Psychrometer, Taupunktsspiegel bezieht man aus Apparatehandlungen oder von Wilhelm Lambrecht in Göttingen; Preis je 20 bis 100 Mk. — Drossel- und Abscheidekalorimeter liefern Schaeffer & Budenberg, Magdeburg-Buckau.

Zu Kapitel XV. Gasanalyse.

Literatur: Winkler, Technische Gasanalyse; Hempel, Gasanalytische Methoden. — E. Meyer, Untersuchung der Abgase am Gasmotor. Z. V. D. I. 1902, S. 948. — Bunte, Selbsttätige Rauchgasanlyse. Z. V. D. I. 1903, S. 1087. — Dosch, Wert und Bestimmung des CO_2-Gehalt der Heizgase; Zusammenstellung der Apparate. Dingler 6. 12. 1902. — Baumgärtner, Ados-Aparat, Z. V. D. I. 1902, S. 320. — Verbesserter Orsat-Apparat, Stahl und Eisen 15. 2. 1903. — Wencelius, Analyse der Hochofen- und Generatorgase, Stahl und Eisen 15. 6. 1902. — Stribeck, Prüfung von Feuerungen, Rußmessung. Z. V. D. I. 1895, S. 184. — Fritzsche, Bestimmung der Rußmenge. Z. V. D. I. 1897, S. 885.

Bezugsquellen: Orsatapparate und ähnliche bezieht man aus den bei Kapitel XI genannten Apparatehandlungen; Preis 50 Mk. und mehr. Selbsttätige Apparate zur Feuerungskontrolle fertigen: Alphons Custodis, Düsseldorf; Wwe. Joh. Schumacher, Köln; G. A. Schultze, Charlottenburg, Charlottenburger Ufer 53 (Krells Rauchgasanalysator); Ados Feuerungstechnische Gesellschaft, Aachen.

Register.

Abkühlungsversuch 7, 53.
Abscheidekalorimeter 198.
Absoluter Druck, Überdruck 93.
Ados 207.
Alden-Bremse 124.
Amsler-Dynamometer 116.
Amsler-Planimeter 26.
Analyse, Kohle 185.
— Kraftgas 211.
— Rauchgas 201.
Anemometer 49, 88.
Anforderungen an techn. Instrumente 11.
Aräometer 56.
Arbeit 108.
Arretieruhr 32.
Aspirator 181.
Atmosphäre (Einheit) 92.
Auffüllmethode 85.
Auftrieb beim Wägen 60.
Ausblasemethode für Gasmessung 86.
Ausdehnung des Quecksilbers 97.
— von Sole 53.
— des Wassers 53.
Ausflußkoeffizient 67, 70, 72.
Ausflußöffnungen 66.
Ausgleichinstrumente 14.
Äußere Bedingungen 11.
Ausströmapparat von Schilling 57.
Austauschbau 24.
Auswertung 5.

Bandbremse 121.
Barometer, abgekürztes 98.
Belastungswiderstände 136.
Beharrungszustand 7.
Bombe 179.
Bourdonsche Feder 99.
Brauersche Methode 69.
Bremsdynamometer, Bremse, Bremskonstante 119, 128.
Bremsung, elektrische 135.
Brennstoffe, Heizwert der festen 179.
Brennstoffe, Heizwert der flüssigen 191.
— — der gasförmigen 211.
—, Zusammensetzung der festen 185.
—, — der gasförmigen 187.
Brutto 63.

Carpenter-Abscheidekalorimeter 199.
— -Kohlenkalorimeter 179.
Celsiusskala 163.
C G S-System 4.
Charakteristik eines Instruments 12.
Chronometer 32.

Dampffeuchtigkeit 196.
Dampfmessung 89.
Darstellung der Eichergebnisse 15.
Dauernd fließende Flüssigkeiten 64.
Diagramm mit Schwingungen 155.
— zur Luftmessung 88.
—, Umrechnung der Einheiten 3.
—, Indikator- 138.
—: Zeit-, Versetzte, Kurbelweg- 151.
Dichte 52, siehe spezifisches Gewicht.
Differentialmanometer 103.
Differenzmethoden 8.
Dimensionen 2.
Drehmoment 108.
Drosselkalorimeter 197.
Druck bei Längenmessung 17.
—, spezifischer 91.
Druckthermometer 171.
Durchflußöffnungen 87.
Dynamometer 112.

Effektive und indizierte Leistung 112
Eichung 11, 15.
— der Gasmesser 84.
— der Indikatorfeder 148.
— der Thermometer 172.
— der Wage 62.
— der Woltmannschen Flügel 46.
Eigenschaften der Instrumente 11.

Einfluß des vorherigen Zustandes 13.
Einheiten 1, 32, 91, 109, 163, 174.
— bei graph. Darstellungen, Umrechnung in andere Einheiten 3.
Elektrische Leistungsmessung 132, 7.
— Temperaturmessung 171.
Endmaße 20.
Englisches Maßsystem 17, 51, 54, 110, 175.
Essengase, Zusammensetzung 201.
Essenverluste 209.

Fadenkorrektion 165.
Federeichung, Federmaßstab 148.
Federmanometer 99.
Federwage 12, 107.
Federschwingungen 153.
Fehler bei der Auswertung 5.
— beim Junkers-Kalorimeter 190.
Feuchtigkeit von Dampf 196.
— bei Gasen 54.
— der Luft 192.
Fischinger-Dynamometer 114.
Fixpunktkontrolle 172.
Fläche 25.
Flügelgleichung 45.
Flügel, hydrometrischer 43.
Flüssigkeitsbremse 126.
Fortschreitende Geschwindigkeit 34.

Gasanalyse 201.
Gasmenge 79, bei Rauchgasen 207.
Gasmesser, -uhr 81.
Gaswage 59.
Gefäßmanometer 97.
Genauigkeit der Berechnung 9.
Geschwindigkeit 32.
Gewicht 51.
Gitterplanimeter 31.
Graphische Darstellungen 3, 9.
Graphitpyrometer 170.
Grenzlehren 24.
Grundeinheiten 2, 4.

Hakenmesser 74.
Hebermanometer 97.
Heizgasanalyse 201.
Heizwert, oberer und unterer 176.
Homogenität von Formeln 2.
Hubminderer, -reduktor 147.
Hydrometr. Flügel 43.
Hygrometer 195.

Indikator 137.
—, Kaltfeder- 145.
Indikator, Spezielle Formen 160—162.
Indikatordiagramm zur Bestimmung der Luftmenge 88.
Indizierte und effektive Leistung 112.
Integraphen 25.
Integrierende Instrumente 14.
Isometrische Darstellung 11.
Junkers-Kalorimeter 187.

Kaliberlehren 24.
Kalibrierte Gefäße 64.
Kalorie 174.
Kalorimeter, Abscheide- 198.
— Bomben- 179.
— Carpenter- 179, 198.
— Drossel- 197.
— Junkers- 187.
Kalorimetrie 173.
Kaltfederindikator 145.
Kilogramm 109.
Kilowatt 109.
Korrektionen 8, 11.
Kohlenstoffgehalt der Kohle 186.
Kolbenmanometer (Kolbenpresse) 101.
Kraft 107.
Kraft und Masse 4.
Kraftgas, Kalorimetrierung 190.
— Zusammensetzung 211.
Krökerbombe 179.
Kugelendmaße 24.
Kurbelwegdiagramme 151.

Länge 17.
Le Chatelier Pyrometer 167.
Leistung 108.
Linearplanimeter 30.
Luftfeuchtigkeit 196.
Luftmenge 79.
Luftüberschuß 204.
Luxsche Einschenkel-Manometer 99.

Mahlerbombe 179.
Manometer 96.
Masse 56, — und Kraft 4.
Massenschwingungen 153.
Maßsystem 4.
Menge der Rauchgase 207.
Meßbereich 39, 165.
Meßglocke 80.
Meßmaschine 22.
Meterkilogramm 109.
Mikrometerschraube 21.
Mittelwert, Fehler bei der Bildung 5.
Mündungen 66.

Nasse Kohle 184.
Naviersche Seilbremse 128.
Netto 63.
Nonius 19.
Nullkreis 27.

Orsat-Apparat 202.

Parallaktischer Fehler 17.
Pferdekraftstunde 110.
Pferdestärke 109.
Pitotrohr 47.
Planimeter 25.
Plattenfedermanometer 100.
Pneumometer 104.
Ponceletöffnungen 66.
Probenahme 184, 200, 206.
Pronyscher Zaum 119.
Prozente bei Vakuumangabe 93.
—, Raum- und Gewichts- 210.
Prozentrechnungen, Fehler bei 5.
Psychrometer 196.
Pumpengang gestört durch Indikator 152.
Pyrometer 167.

Quadratischer Mittelwert 5.
Quecksilber, Ausdehnung 97.
Quecksilbermanometer 96.
Quecksilberthermometer 164.

Rauchgase, Zusammensetzung 201.
Rauchgasmenge 207.
Recknagel 104.
Reduktion der Gasmenge 54, 55.
Relativgewicht 52, 57, 59.
Röhrenfedermanometer 99.
Rotationsdynamometer 113.

Sauggas, Kalorimetrierung 189.
Schaltung, elektrische 134.
Schaltwerk 35.
Schaubild 9.
Schraublehre 21.
Schwankende Größen 13.
Schwingungen im Diagramm 155.
Seilbremse 128.
Simpsonsche Regel 31.
Skaleninstrumente 14.
Solemenge 53.
Spannung 91.
Spezifische Wärme des Wassers 175.
Spezifischer Dampfgehalt 197.
Spezifischer Druck 91.
Spezifisches Gewicht 51, 56.
Spezifisches Gewicht des Quecksilbers 92, 97.
— des Wassers 53.
Sphärische Endmaße 24.
Standhöhe 68, 73.
Statischer Druck 48.
Stauscheibe 51.
Stichmaße 24.
Stickstoffthermometer 165.
Stoffmenge 51.
Strahlung 180, 183, 185.
Strichmaße 20.

Tachograph 42.
Tachometer 37.
Tachometer und Zählwerk 41.
Tara 63.
Taupunkt, Taupunktspiegel 194.
Temperatur 163.
— bei Mengenmessungen 52.
— bei Längenmaßen 17.
Temperaturkorrektion bei Quecksilbermanometer 97.
Thalpotasimeter 170.
Thermoelektrische Pyrometer 167.
Thermometer 164.
—, Anbringung 167.
—, Trägheit 14.
Totalisierende Instrumente 14.
Tourenzähler 34.
Trägheit 13.
Trommelbewegung 157.

Überfallmessung 69.
Umlaufzähler 34.
Umrechnung der Vakuumangaben 93.
— in andere Einheiten 3, 4.
—, Raum und Gewichtsprozente 210.
Unempfindlichkeit 12.
Ungenauigkeit 12.
Ungleichförmigkeit 41.
Unsicherheiten in physik. Grnndlagen 9.

Vakuumangaben 93.
Vakuummeter 97.
Ventilatoren, Wirkungsgrad der 192.
Verluste, Essen 209.
Versetzte Diagramme 151.
Volumen 52.

Wage 60.
Wärmeeinheit 110, 174.
Wärmemenge 173.
Wasser, Ausdehnung 53.

Wasser, spezifische Wärme 174.
Wasserbestimmung 186, 180, 182.
Wasserfluß 65.
Wassergeschwindigkeit 43.
Wassermanometer 98.
Wassermesser 76.
Wasserstoffbestimmung 211.
Wasserstoffthermometer 163.
Wasserwert des Kalorimeters 182.
Wasserwiderstand. 137.
Watt 109.
Wehrkonstruktion 73.
Wehrmessung 69.
Widerstände, Belastungs-, 136.
Windrad 49.
Winkelgeschwindigkeit 33.
Wirbelstrombremse 127.
Wirkungsgrad elektr. Maschinen 132.
Woltmannscher Flügel 43, 75.

Zählwerk 34.
Zahndruck-Dynamometer 115.
Zaum 119.
Zeit 32.
Zeitdiagramm 151.
Zugmesser 103.
Zusammengesetzte Einheiten 1.
Zusammensetzung, Kohle 185.
—, Kraftgas 211.
—, Rauchgase 201.
Zylinderkonstante 141.

Technische Untersuchungsmethoden zur Betriebskontrolle, insbesondere zur Kontrolle des Dampfbetriebes. Zugleich ein Leitfaden für die Arbeiten in den Maschinenbaulaboratorien technischer Lehranstalten. Von Julius Brand, Ingenieur, Oberlehrer der Königlichen vereinigten Maschinenbauschulen zu Elberfeld. Mit 168 Textfiguren, 2 Tafeln und mehreren Tabellen. In Leinwand gebunden Preis M. 6,—.

Hilfsbuch für Dampfmaschinen-Techniker. Unter Mitwirkung von Professor A. Kás verfaßt und herausgegeben von Josef Hrabák, k. u. k. Hofrat, emer. Professor an der k. k. Bergakademie zu Přibram. Dritte Auflage. In zwei Teilen. Mit Textfiguren. In Leinwand gebunden Preis M. 16,—.

Theorie und Berechnung der Heißdampfmaschinen. Mit einem Anhange über die Zweizylinder-Kondensations-Maschinen mit hohem Dampfdruck. Von Josef Hrabák, k. u. k. Hofrat, emer. Professor der k. k. Bergakademie zu Přibram. In Leinwand gebunden Preis M. 7,—.

Berechnung der Leistung und des Dampfverbrauches der Einzylinder-Dampfmaschinen. Ein Taschenbuch zum Gebrauch in der Praxis. Von Josef Pechan, Professor des Maschinenbaues an der k. k. Staatsgewerbeschule in Reichenberg. Mit 6 Textfiguren u. 38 Tabellen. In Leinwand geb. Preis M. 5,—.

Die Bedingungen für eine gute Regulierung. Eine Untersuchung der Regulierungsvorgänge bei Dampfmaschinen und Turbinen. Von J. Isaachsen, Ingenieur. Mit 34 Textfiguren. Preis M. 2,—.

Der Regulierungsvorgang bei Dampfmaschinen. Von Dr.-Ing. B. Rülf. Mit 15 Textfiguren nnd 3 Tafeln. Preis M. 2,—.

Die Steuerungen der Dampfmaschinen. Von Carl Leist, Professor an der Kgl. Technischen Hochschule zu Berlin. Zweite, sehr vermehrte und umgearbeitete Auflage, zugleich als fünfte Auflage des gleichnamigen Werkes von Emil Blaha. Mit 553 Textfiguren. In Leinwand gebunden Preis M. 20,—.

Generator-Kraftgas- und Dampfkessel-Betrieb in bezug auf Wärmeerzeugung und Wärmeverwendung. Eine Darstellung der Vorgänge, der Untersuchungs- und Kontrollmethoden bei der Umformung von Brennstoffen für den Generator-Kraftgas- und Dampfkessel-Betrieb. Von Paul Fuchs, Ingenieur. Zweite Auflage von „Die Kontrolle des Dampfkesselbetriebes". Mit 42 Textfiguren. In Leinwand gebunden Preis M. 5,—.

Die Dampfkessel. Ein Lehr- und Handbuch für Studierende Technischer Hochschulen, Schüler Höherer Maschinenbauschulen und Techniken, sowie für Ingenieure und Techniker. Von F. Tetzner, Professor, Oberlehrer an den Königl. vereinigten Maschinenbauschulen zu Dortmund. Zweite, verbesserte Auflage. Mit 134 Textfiguren und 38 lithogr. Tafeln. In Leinwand gebunden Preis M. 8,—.

Die Dampfturbinen mit einem Anhange über die Aussichten der Wärmekraftmaschinen und der Gasturbine. Von Dr. A. Stodola, Professor am Eidgenössischen Polytechnikum in Zürich. Dritte, bedeutend erweiterte Auflage. Mit 434 Textfiguren und 3 lithogr. Tafeln. In Leinwand geb. Preis M. 20,—.

Hilfsbuch für den Maschinenbau. Für Maschinentechniker sowie für den Unterricht an technischen Lehranstalten. Von Fr. Freytag, Professor, Lehrer an den technischen Lehranstalten in Chemnitz. Mit 867 Textfiguren und 6 Tafeln. In Leinwand geb. Preis M. 10,—; in Leder geb. Preis M. 12,—.

Moderne Arbeitsmethoden im Maschinenbau. Von John T. Usher. Autorisierte deutsche Bearbeitung von A. Elfes, Ingenieur. Zweite, verbesserte Auflage. Mit 275 Textfiguren. In Leinwand geb. Preis M. 6,—.

Handbuch der Materialienkunde für den Maschinenbau. Von A. Martens, Professor und Direktor der Kgl. Mechan.-techn. Versuchsanstalt zu Berlin-Charlottenburg. Erster Teil. Materialprüfungswesen, Probiermaschinen und Meßinstrumente. Mit 514 Textfig. u. 20 Tafeln. In Leinwand geb. Preis M. 40,—.

Elastizität und Festigkeit. Die für die Technik wichtigsten Sätze und deren erfahrungsmäßige Grundlage. Von C. Bach. K. Württ. Baudirektor, Prof. des Masch.-Ingenieurwesens an der Techn. Hochschule Stuttgart. Fünfte Auflage unter der Presse.

Die Werkzeugmaschinen. Von Hermann Fischer. Geh. Regierungsrat und Professor an der Kgl. Technischen Hochschule zu Hannover. I. Die Metallbearbeitungsmaschinen. Zweite, verm. und verbess. Auflage. Mit 1545 Textfiguren und 50 lithogr. Tafeln. 2 Bände. In Leinwand geb. Preis M. 45,—. II. Die Holzbearbeitungsmaschinen. Mit 421 Textfig. In Leinw. geb. Pr. M. 15,—.

Die Gebläse. Bau und Berechnung der Maschinen zur Bewegung, Verdichtung und Verdünnung der Luft. Von Albrecht von Ihering, Kaiserl. Reg.-Rat, Mitglied des Kaiserl. Patentamtes, Dozent an der Königl. Friedrich-Wilhelms-Universität zu Berlin. Zweite, umgearbeitete und vermehrte Auflage. Mit 522 Textfiguren und 11 Tafeln. In Leinwand gebunden Preis M. 20,—.

Die Hebezeuge. Theorie und Kritik ausgeführter Konstruktionen mit besonderer Berücksichtigung der elektrischen Anlagen. Ein Handbuch für Ingenieure, Techniker und Studierende. Von Ad. Ernst, Prof. d. Maschinen-Ingenieurwesens an der Kgl. Techn. Hochschule zu Stuttgart. Vierte, neubearb. Auflage. 3 Bände. Mit 1486 Textfig. u. 97 lithogr. Tafeln. In 3 Lwdbd. geb. Pr. M. 60,—.

Das Entwerfen und Berechnen der Verbrennungsmotoren. Handbuch für Konstrukteure und Erbauer von Gas- und Ölkraftmaschinen. Von Hugo Güldner, Oberingenieur, gerichtlich vereideter Sachverständiger für Motorenbau. Zweite Auflage unter der Presse.

Lüftungs- und Heizungs-Anlagen. Leitfaden zum Berechnen und Entwerfen. Auf Anregung Seiner Exzellenz des Herrn Minister der öffentlichen Arbeiten verfaßt von H. Rietschel, Geh. Regierungsrat, Professor an der Kgl. Techn. Hochschule zu Berlin. Dritte, vollständig neu bearbeitete Aufl. Zwei Teile. — Mit 72 Textfiguren, 21 Tabellen und 28 Tafeln. In 2 Lwdbde. geb. Pr. M. 20,—.

Die Regelung der Kraftmaschinen. Berechnung u. Konstruktion d. Schwungräder, des Massenausgleichs und der Kraftmaschinenregler in elementarer Behandlung. Von Max Tolle, Professor und Maschinenbauschuldirektor. Mit 372 Textfiguren und 9 Tafeln. In Leinwand geb. Preis M. 14,—.

89088908140
b89088908140a

89088908140

B89088908140A